

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie - 345

Studium trvanlivosti povlaku obráběcího nástroje

Study of Durability Coating Shaping tools

Student:

Jaroslav Vašíček

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc

Ostrava 2015

Zadání bakalářské práce

Student: **Jaroslav Vašíček**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Studium trvanlivosti povlaku obráběcího nástroje**
Study of Durability Coating Shaping Tools

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rozbor současného stavu používaných povlaků na nástroje.
2. Prostudujte povrchovou úpravu nástroje před povlakováním.
3. Prostudujte vlastnosti povlaků vhodné pro povlakování nástrojů.
4. Navrhněte metodiku experimentálních prací.
5. Proved'te experimentální práce a jejich vyhodnocení.
6. Zpracujte technickou zprávu.

Seznam doporučené odborné literatury:

BURAKOWSKI, T., WIERZCHOŃ, T.: *Surface Engineering of Materials*. CRC Press LLC, 1999. 592 s. ISBN 0-8493-8225-4.

FREMUNT, P., PODRÁBSKÝ, T.: *Konstrukční oceli*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, Brno, 1996. 261 s. ISBN 80-85867-95-8


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.**

Datum zadání: **12.12.2014**

Datum odevzdání: **18.05.2015**




doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřisežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

18.5.2015



Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB -TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.5.2015



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jaroslav Vašíček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Lidická 919, 56301 Lanškroun

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vašíček, J. *Studium trvanlivosti povlaku obráběcího nástroje*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2015, 66 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Podjuklová, J., CSc.

Cílem bakalářské práce je porovnat dva povlaky TripleCoating Cr a Marwin G prodávané pod tímto obchodním názvem firmou SHM, s.r.o. Povlak Marwin G je v současné době aplikován při renovaci nástrojů ve firmě SOMA spol. s r.o. V případě úspěchu testů nového povlaku firmy SHM, s.r.o. plánuje změnu deponovaných povlaků při renovaci nástrojů. V úvodu je popsána historie firmy a její výrobní program. V navazující části jsou popsány mechanismy ovlivňující životnost nástroje. Navazuje na to popis použitých PVD povlaků a předúprava povrchu nástroje. Experimentální část bakalářské práce je věnována konkrétnímu testu opotřebení zmíněných povlaků. Povlak je deponován na stopkové frézy. Test probíhá za konstantních řezných podmínek, při kterém monitorujeme velikost opotřebení v závislosti na čase. V závěru je provedeno vyhodnocení této práce.

BACHELOR'S WORK ABSTRACT

Vašíček, J. *Study of Durability Coating Shaping tools*: Bachelor's Work. Ostrava: VŠB - Technical University Ostrava, Mechanical Faculty, Mechanical Technology Department, 2015, 66 pp. The Work Supervisor: doc. Ing. Podjuklová, J., CSc.

The aim of this work is to compare two coatings TripleCoating Cr and Marwin G sold under this commercial name by SHM, Ltd. Marwin G Coating has currently been applied for the tools renovation in SOMA, Ltd. In the case of successful tests of the new SHM, Ltd. coating the change of deposited coatings is being planned for tools renovation. In the introduction the history of firm and its production programme are described. In the following part mechanisms that influence the tool lifespan are described. The used PVD coatings description and tool surface preliminary adjustment follow. The experimental part of the Bachelor's Work is dedicated to the mentioned coatings wearing test. The coating is deposited to the end mills. The test takes place in the constant cutting conditions and the size of wearing is being monitored in dependence on time. In the conclusion the evaluation of the work is given.

Obsah

	strana
Seznam použitých symbolů a zkratk	9
0 Úvod	13
1 O společnosti	14
2 Mechanismy ovlivňující životnost nástroje	15
2.1 Opotřebení řezných nástrojů	15
2.1.1 Klasifikace typů opotřebení	17
2.1.2 Měření opotřebení	23
2.2 Trvanlivost a životnost nástroje	24
2.3 Teorie třískového obrábění	27
2.3.1 Druhy frézování	27
2.3.2 Řezné podmínky	28
2.3.3 Průřez třísky	29
2.3.4 Řezné síly při obrábění	30
2.4 Geometrie HM frézy stopkové	33
2.4.1 Nástrojová rovina	33
2.4.2 Pracovní rovina	33
2.4.3 Nástrojové úhly	36
2.4.4 Volba geometrických parametrů břitu	38
3 Popis použitých PVD povlaků	39
3.1 Princip tvorby PVD povlaků	40
3.1.1 Technologie napařování nízkonapětovým obloukem	40
3.1.2 Magnetronové napařování	41
3.2 Charakteristiky testovaných povlaků	42
3.1.3 TripleCoating Cr	42
3.1.4 Marwin G	43

4	Úpravy povrchů před povlakováním.....	44
4.1	Úprava břitů omíláním.....	45
4.2	Úprava povrchu břitů mokřým otryskáním.....	46
4.3	Odstranění starých povlaků.....	47
5	Experimentální část bakalářské práce.....	48
5.1	Testovaný nástroj.....	48
5.2	Použitý materiál na testy.....	50
5.3	Parametry testů.....	51
5.4	Postup testu.....	52
5.5	Testovaný povlak – TripleCoating Cr.....	53
5.6	Testovaný povlak – Marwin G.....	54
5.7	Vyhodnocení výsledků.....	55
5.7.1	Vyhodnocení povlaku TripleCoating Cr.....	56
5.7.2	Vyhodnocení povlaku Marwin G.....	57
6	Závěr.....	58
7	Seznam použité literatury.....	60
8	Seznam obrázků.....	64
9	Seznam tabulek.....	65
10	Seznam příloh na CD.....	65
	Poděkování.....	66

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ZNAČENÍ	VÝZNAM	JEDNOTKA
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]
C_T	Konstanta Taylorova vztahu	[-]
m	Míra závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti	[-]
t	Čas	[min]
T	Trvanlivost břitu	[min]
a_p	Hloubka záběru	[mm]
f	Posuv	[mm]
x, y	Exponenty Taylorova vztahu	[-]
PVD	Fyzikální depozice z plynné fáze	[-]
CVD	Chemická depozice z plynné fáze	[-]
TiN	Nitrid titanu	[-]
TiAlN	Nitrid titanu a hliníku	[-]
TiCN	Karbonitrid titanu	[-]
AlTiN	Nitrid hliník a titanu	[-]
Cr	Chrom	[-]
Al	Hliník	[-]
Si	Křemík	[-]
N	Dusík	[-]
VB	Šířka opotřebené plochy na hřbetu	[-]
KB	Šířka žlábků na čele	[-]
SiC	Karbid křemíku	[-]
Al_2O_3	Oxid hlinitý	[-]
Ti	Titan	[-]
HSS	Rychlořezná ocel	[-]
Co	Kobalt	[-]
ČSN	Československá státní norma	[-]

ZNAČENÍ	VÝZNAM	JEDNOTKA
DIN	Německá národní norma	[-]
EN	Evropská norma	[-]
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	[-]
V	Objem	cm ³
C	Uhlík	[-]
P	Fosfor	[-]
S	Síra	[-]
N	Dusík	[-]
n	Otáčky	[1/min]
h _i	Jmenovitá tloušťka třísky	[mm]
D	Průměr nástroje	[mm]
v _c	Řezná rychlost	[m/min]
f _n	Posuv na otáčku	[mm]
z	Počet zubů (břitů) nástroje	[-]
f _z	Posuv na zub	[mm]
v _f	Posuvová rychlost	[mm/min]
φ _i	Úhel posuvového pohybu	[°]
A _{Di}	Jmenovitý průřez třísky	[mm ²]
κ _r	Úhlem nastavení hlavního ostří	[°]
b	Šířka obráběná plochy	[mm]
n _z	Počet zubů v záběru	[-]
ψ	Úhel záběru frézy	[°]
F	Síla při obrábění	[N]
R	Řezný odpor	[N]
F _{ok}	Síla při obrábění - kolísavá	[N]
k _c	Měrná řezná síla	[MPa]
F _c	Řezná složka síly při obrábění	[N]
F _f	Posuvová složka síly při obrábění	[N]

ZNAČENÍ	VÝZNAM	JEDNOTKA
F_1	Aktivní složka řezání	[N]
F_2	Pasivní složka řezání	[N]
F_C	Tangenciální složka síly při řezání	[N]
C_{FC}	Konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu	[-]
x	Exponent vlivu tloušťky třísky	[-]
h	Tloušťka třísky	[mm]
P_r	Nástrojová rovina základní	[-]
P_f	Nástrojová rovina boční	[-]
P_p	Nástrojová rovina zadní	[-]
P_s	Nástrojová rovina ostří	[-]
λ_s	Úhel sklonu ostří	[°]
P_o	Nástrojová rovina ortogonální	[-]
P_n	Nástrojová rovina normálová	[-]
γ	Úhel sklonu čela	[°]
α	Úhel sklonu hřbetu	[°]
β	Úhel sklonu břitu	[°]
ψ_r	Doplňkový úhel nastavení hlavního ostří	[°]
ε_r	Nástrojový úhel špičky	[°]
KT	Hloubka žlábků na čele	[-]
KL	Vzdálenost ostří k okraji žlábků	[-]
KM	Vzdálenost ostří ke středu žlábků	[-]
VR	Radiální otupení	[-]
CNC	Počítačově číslicově řízené obráběcí stroje	[-]
S	Ostří nástroje	[-]
v_e	Výsledný řezný pohyb	[m/min]

ZNAČENÍ	VÝZNAM	JEDNOTKA
a_e	Šířka záběru	[mm]
HM	Slinutý karbid	[-]

0 ÚVOD

Ve strojírenství se většina výrobků vyrábí třískovým obráběním. Při tomto způsobu obrábění vniká nástroj do obrobku. Tím zde vyvolá stav napjatosti, který způsobí, že se část materiálu obrobku oddělí ve formě třísky. To vše má negativní vliv na nástroj. Nástroj se otupuje. Povrch nástroje i jeho zbylá část jsou vystaveny značnému namáhání. Je vhodné nástroj břitů chránit povlakem pro zvýšení životnosti nástroje. Ochranu poskytuje správná volba povlaku. Povlak zlepšuje řezné vlastnosti nástroje. K určení optimálního povlaku se musí zohlednit, jaký materiál se bude obrábět, materiál nástroje, technologie obrábění a řezná rychlost. Vhodně zvolený povlak zefektivní a zrychlí výrobu.

Povlak lze nanést dvěma metodami a to PVD (fyzikální depozice z plynné fáze) a CVD (chemická depozice z plynné fáze). V rámci těchto metod každý specifický povlak vyžaduje specifický postup. Obě tyto technologie jsou velmi náročné na přístrojové vybavení a čistotu procesu.

Cílem této práce je praktické porovnání dvou povlaků Triple Coating Cr a Marwin G, které budou nanášeny na čtyři frézy. Test spočívá v experimentálním měření opotřebení. Nástrojem je stopková hrubovací fréza o průměru $D=16\text{mm}$. Depozice povlaků provede firma SHM, s.r.o. metodou PVD a technologií napařování nízkonapětovým obloukem. Test bude probíhat za konstantních řezných podmínek, při kterém bude monitorována velikost opotřebení v závislosti na čase. Měření se bude provádět za pomoci Brinellovy lupy. Konstantní řezné podmínky byly zvoleny pro snadnější posuzování testovaných povlaků a jejich vyhodnocení. V závěru této práce je provedeno vyhodnocení.

1 O SPOLEČNOSTI

Tématem bakalářská práce je studie trvanlivosti povlaku obráběcího nástroje. Na tvorbě bakalářské práce se podílela firma SOMA spol. s r.o. Tato společnost sídlí v Lanškrouně. Zabývá se výrobou a vývojem vysoce kvalitních speciálních jednoúčelových zařízení, strojů na zpracování a potisk materiálů (papír a folie). Zejména pak flexotiskových strojů, podélných řezaček, montážních stolic, laminátorů, příčných řezaček a vysekávacích automatů. Na obr. 1 je letecký snímek firmy po rozšíření v roce 2012. Firma SOMA spol. s r.o. byla založena roku 1992 privatizací části státního podniku TESLA s. p. a dnes zaměstnává 210 lidí, z toho více jak polovina pracuje v konstrukci a v administrativě s ní spojenou. SOMA spol. s r.o. se z malého místního výrobce, který se zabýval převážně výrobou jednoúčelových strojů, vyvinula v uznávaného světového hráče na poli flexografického a obalového průmyslu. Výrobu většiny mechanických dílů se firma snaží pokrýt sama a zbytek kooperuje s vybranými společnostmi. [27]

Více informací o firmě SOMA spol. s r.o. a jejích produktech lze nalézt např. [27]



Obr. 1 Sídlo firmy SOMA spol. s r.o. [27]

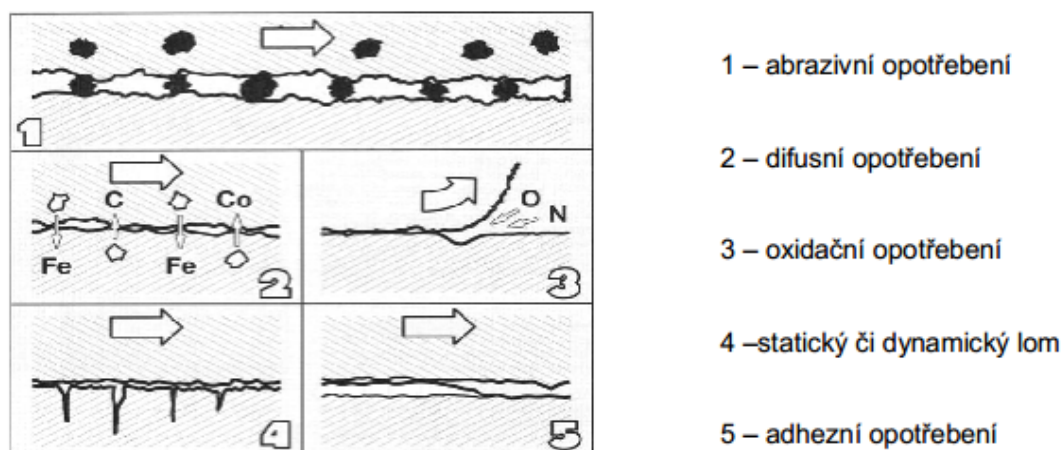
2 MECHANISMY OVLIVŇUJÍCÍ ŽIVOTNOST NÁSTROJE

2.1 Opotřebení řezných nástrojů

Opotřebení vzniká tam, kde dochází ke kontaktu a zároveň pohybu dvou a více strojních součástí. Při obrábění tento vzájemný pohyb a kontakt vytváří obrobek a nástroj. Relativní pohyb je mezi obrobkem, hlavním a vedlejším hřbetem, ale i na špičce nástroje. Také odcházející tříska je v kontaktu s čelem nástroje, což také vede k jeho opotřebení. Opotřebení je velice složitý děj, na který má vliv mnoho faktorů (fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu, vlastnosti nástroje (materiál, geometrie, povrch), druh obráběcí operace, pracovní podmínky, řezné prostředí, atd.) na jeho průběhu působí mnoho fyzikálně-chemických jevů (mechanismů opotřebení). Jejich základní rozdělení je na obr. 2 [13]

K základním mechanismům opotřebení patří zejména: [13]

- **abraze** (Brusný otěr, který je vyvolán tvrdými mikročásticemi buď materiálu obrobku, nebo uvolněných zrn z nástroje).
- **adheze** (Na stýkajících vrcholcích čela a třísky vznikají mikro sváry. Ty jsou poté odlupovány odcházející třískou, což může vést k vylomení nástroje. Tento děj probíhá v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů).
- **difúze** (Chemický děj, při němž dochází k migraci atomů mezi obráběným materiálem a nástrojem. Vytvářejí se nežádoucí chemické sloučeniny ve struktuře nástroje).
- **oxidace** (Na povrchu nástroje dochází ke vzniku chemických sloučenin v důsledku přítomnosti kyslíku v okolí při obrábění).
- **plastická deformace** (Vlivem vysokých teplot a mechanického zatížení, které působí na nástroj, může dojít k jeho deformaci. Popřípadě lavinovému efektu).
- **křehký lom** (Vzniká při vysokém mechanickém zatížení, např. přerušovaném řezu, nehomogenitě a při vměstcích v obráběném materiálu, atd.).



Obr. 2 Hlavní mechanismy opotřebení břitu nástroje [14]

2.1.1 Klasifikace typů opotřebení

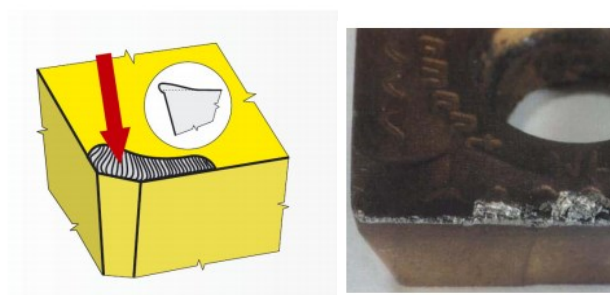
Klasifikace opotřebení a její rozdělení na jednotlivé typy byla vytvořena na základě potřeby posoudit obráběcí operace, a tím i ovlivnit produktivitu. Dalšími faktory, které ovlivňují jaký druh materiálu použít na nástroj a jaké zvolit jeho odpovídající parametry jsou mimo jiné: [14]

- přesnost rozměrů
- jakost obrobené plochy
- kontrolovaný odchod třísky

Jsou posuzována opotřebení, která jsou viditelná na nástroji při sledování ploch řezného nástroje při optickém zvětšení. Lze určit, kde dochází k největšímu opotřebení a stanovit jeho velikost v závislosti na obráběcím čase. Je možno prodloužit jeho trvanlivost, spolehlivost a dokonce i životnost. Pro každý proces obrábění existuje optimální průběh opotřebení, ale jen za předpokladu, že je použit správný materiál nástroje a odpovídající řezné podmínky na konkrétní materiál. Ke správnému řešení lze nalézt kvalifikovanou odbornou pomocí, vlastní zkušeností, testy a zkouškami jednotlivých materiálů a podmínek při obrábění. Toto jsou důležité předpoklady pro vznik optimálního průběhu opotřebení. [14]

Tvorba nárůstku

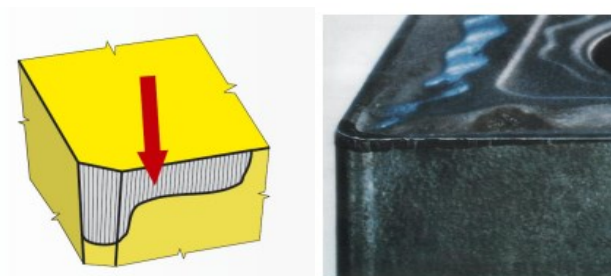
Materiál se nalepuje na nástroj ve formě malého návaru, který se nazývá nárůstek. Je nebezpečný tím, že jednak zhoršuje kvalitu obráběné plochy a zároveň přispívá k možnému vzniku porušení břitu nástroje. Nárůstek je velmi nestabilní. Jeho velikost v průběhu obrábění nahodile kolísá. Ukázka na obr. 3, kde je nárůstek, který způsobil poškození ostří nástroje. [15]



Obr. 3 Místo výskytu nárůstku [15],[25]

Opotřebení hřbetu

Opotřebení vzniká mezi plochami hřbetu nástroje a již obrobenu plochou obrobku. Je to zapříčiněno zbytkovými deformacemi. To znamená, že se tomuto opotřebení nelze vyhnout. Lze ho pouze snížit. Otěr je znázorněn na obr. 4. [15]



Obr. 4 Místo výskytu opotřebení hřbetu [15], [25]

Výmol na čele

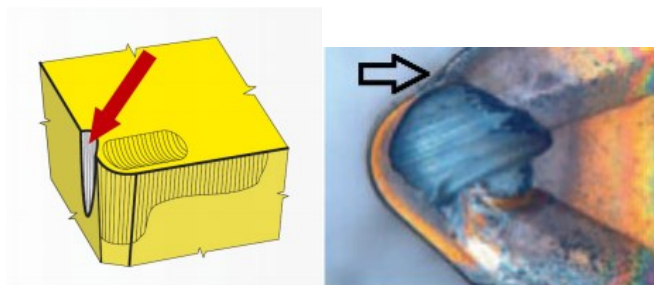
Výmol se utváří na čele nástroje, viz obr. 5. Je to typické opotřebení pro VBD s rovným čelem, ale neplatí jen pro tento typ destiček. Velikost a tvar výmolu jsou určeny obráběným materiálem. Čím je materiál tvrdší, tím je výmol hlubší a tenčí a naopak u měkkých materiálů je širší a mělký. Jeho poloha vůči hraně břitu se mění v závislosti na řezné rychlosti. [15]



Obr. 5 Místo výskytu výmolu na čele [15], [25]

Oxidační rýha na vedlejším břitu

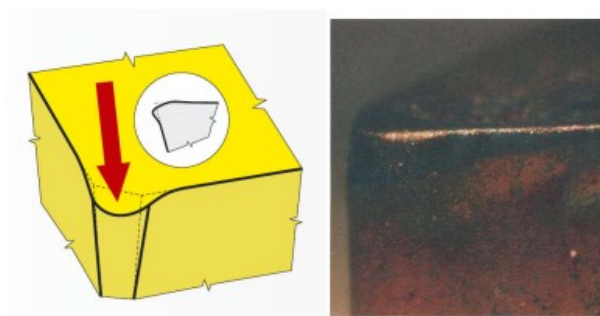
Oxidační rýha je jeden z limitujících prvků životnosti nástroje. Nejvíce se vyskytuje při soustružení a při použití VBD. Díky ní a výmolu na čele nástroje se zhorší drsnost obrobené plochy. Oxidační rýha se obvykle vyskytuje na vedlejším ostří obr. 6. [15]



Obr. 6 Místo oxidační rýhy na vedlejším břitu [15], [15]

Plastická deformace špičky

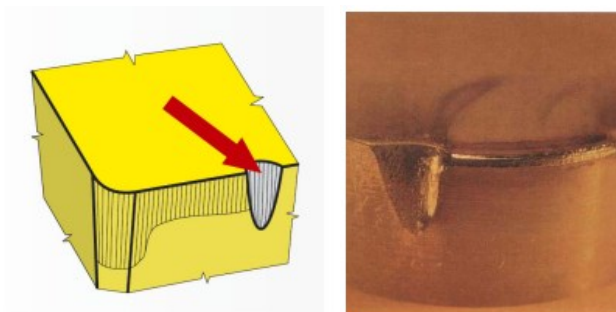
Vlivem vysokých teplot a tlaků, které vznikají při obrábění, je špička nástroje velice namáhána, proto může dojít k plastické deformaci. Na obr. 7 je znázorněna plastická deformace. [15]



Obr. 7 Místo výskytu plastické deformace špičky [15], [25]

Vrubové opotřebení na hlavním břitu

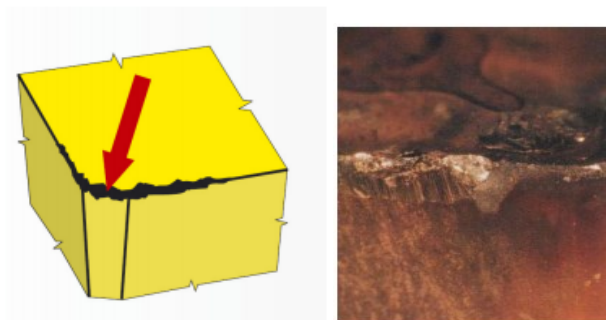
Vznik vrubového opotřebení je způsoben zpevněním povrchu obrobku a otřepy. Vzniká na hlavním ostří nástroje obr. 8. Nejčastěji se s tímto typem opotřebení setkáváme při obrábění austenitických ocelí. [15]



Obr. 8 Místo výskytu vrubového opotřebení na hlavním břitu [15], [25]

Křehké porušování řezné hrany

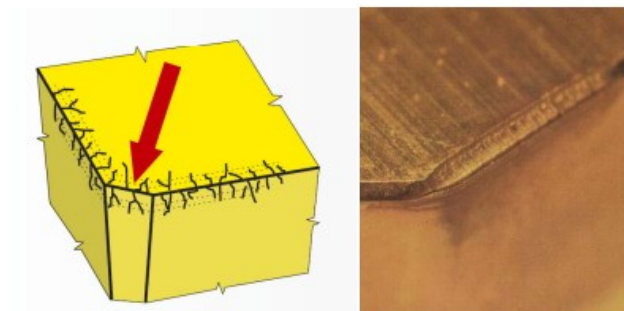
Porušení řezné hrany se ve většině případů vyskytuje v kombinaci s jiným typem opotřebení, je díky tomu samostatně obtížně identifikovatelné. Jeho příčiny bývají zejména nízká tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek. Umístění a vizuální snímek je na obr. 9. [15]



Obr. 9 Místo výskytu křehkého porušení řezné hrany [15], [25]

Hřebenovité trhliny

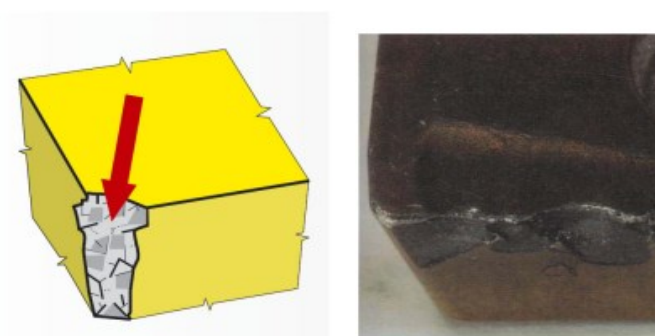
Tento jev se vyskytuje v důsledku dynamického a tepelného zatížení při přerušovaném řezu. Znázorněn je na obr. 10. [15]



Obr. 10 Místo výskytu hřebenovitých trhlin [15], [25]

Destrukce bříty resp. špičky nástroje

Příčina vzniku tohoto jevu může být různá. Záleží na mnoha faktorech. Destrukce je nejvíce ovlivňována materiálem obrobku i nástrojem. Také řeznými podmínkami a dále záleží zejména na tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek. Vliv má i velikost a typ opotřebení a záběrové podmínky. Destrukce se projeví vyštípnutím špičky nástroje viz obr. 11. [15]



Obr. 11 Destrukce bříty [15], [25]

Výčet těchto opotřebení, deformací a lomů je nejdůležitější s ohledem na životnost nástroje. Při každém třískovém obrábění, dochází k opotřebení nástroje. Cílem práce je najít optimální průběh opotřebení a předvídat ho. Vyvážené opotřebení prodlouží životnost a může zefektivnit výrobu, nebo alespoň předvídat trvanlivost břitu nástroje pro jeho včasnou výměnu a naostření. Základem je pochopit mechanismus opotřebení a analyzovat jeho typ. To vede ke správné volbě materiálu řezných nástrojů, geometrie břitů, podmínek obrábění s ohledem na materiál obrobků. S dobrými znalostmi v tomto oboru je možné volit výkonné řezné materiály, správné geometrie břitu a zefektivňovat obráběcí podmínky. Výsledkem je optimální způsob obrábění a snížení nákladů na výrobu. [14]

Otupení neboli opotřebení obráběcího nástroje se dá stanovit mnoha způsoby dle řady autorů. Norma ISO 3685 uvádí následující formy opotřebení s výčtem jednotlivými charakteristik. Ty jsou znázorněny na obr. 12. [14]

VB – šířka opotřebené plochy na hřbetu

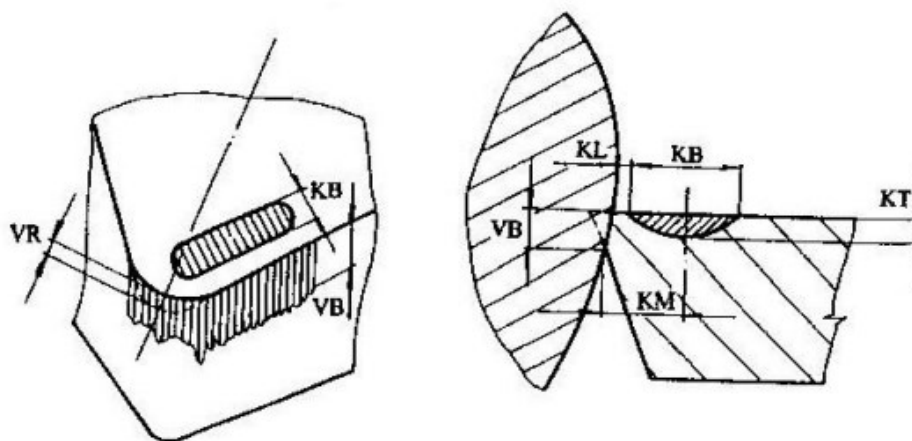
KB – šířka žlábků na čele

KT – hloubka žlábků na čele

KL – vzdálenost ostří k okraji žlábků

KM – vzdálenost ostří ke středu žlábků

VR – radiální otupení



Obr. 12 Délkové charakteristiky otupení břitu [16]

2.1.2 Měření opotřebení

Získání všech empirických údajů je díky řadě experimentů studie opotřebení a otupení břitů. Díky těmto údajům je možné optimalizovat řezné parametry pro delší trvanlivost břitů. Při zjišťování velikosti opotřebení se používají dvě metody, a to přímé a nepřímé. [14]

Přímé metody měření opotřebení

Přímé metody se velmi těžce dají provést. Je to z důvodu toho, že při obrábění jsou plochy nepřístupné, a tím jakékoli měření a zjišťování stavu nástroje je neproveditelné. Jediná možnost je obrábění přerušit. To znamená, že pokus bude zkreslený tímto přerušením. Bude to mít na něj vliv. Nejen přerušení, ale i v některých případech sundání nástroje z držáku a jeho nové najetí do řezu, má zásadní vliv na ovlivnění celého experimentu. [14]

Mezi přímé metody patří: [14]

- metoda váhová (hmotnostní)
- metoda radioaktivních izotopů (radioizotopová)
- metoda mikrometrická
- metoda optická (stínová)
- metoda nanosené odporové vrstvy
- metoda pneumatická

Jako příklad zde uvádím **mikrometrickou metodu**, která je použita v této práci. Při této metodě se měří lineární rozměr přímo. Zjišťuje se nejčastěji dílenskými mikroskopy. V této bakalářské práci bude použita Brinellova lupa. Hloubka žlábků je měřena číselníkovými úchylkoměry, komparátory, apod. Tuto metodu nelze použít přímo v reálném čase při obrábění. Některé software dovolují vyhodnocovat velikost opotřebení přímo v provozu na mikroskopu. Nejprve je nutné kalibrovat optiku na dané zvětšení pro dané opotřebení, a potom lze měřit přímo hodnoty a zaznamenávat kóty a data. [14]

Nepřímé metody měření opotřebení

Metody nepřímé se určily z praxe a dlouholetých zkušeností. Souvisí s některými doprovodnými znaky, které proces obrábění jen doprovází, a proto jsou pouze informativní. [14]

Všechny tyto metody jsou pouze přibližné: [14]

- vznik lesklého proužku na povrchu obrobku
- vzrůst složek řezné síly
- zvýšení výkonu řezání
- zvýšení teploty řezání
- vznik chvění nebo nežádoucího doprovodného zvuku
- změna barvy a tvaru třísky
- změna rozměrů obrobku
- zhoršení drsnosti povrchu
- emise signálů v pásmu ultrazvuku (akustická emise)

2.2 Trvanlivost a životnost nástroje

Vlivem obrábění se nástroj mechanicky a chemicky poškozuje. Vlivem otupení se jeho řezivost snižuje. To se projeví zvýšením řezného odporu, tím i příkonu stroje. Dále následuje chvění obrobku, zhoršení přesnosti a kvality obrobených ploch. Proto je nutné při určitém stupni otupení, nástroj ze stroje vyjmout a znovu ho nechat naostřit. Jedná-li se o VBD pootočí se na jiný břit. Doba práce nástroje při jednom jeho naostření se značí jako jeho trvanlivost. Udává se v minutách. [17]

Cílem je najít optimální proces opotřebení - ten je bezpečný, kontrolovatelný a předvídatelný. Optimální proces opotřebení je otěr na hřbetu nebo výmol na čele. Všech ostatních typů opotřebení je zapotřebí se vyvarovat, protože mohou vyústit v nebezpečné chování břitu jako jeho vylomení nebo lavinovitému efektu. Vše může vyústit až zalomím nástroje, a nebo zhoršením obrobené plochy. [18]

Životnost každého nástroje je součet všech trvanlivostí od prvního použití nástroje do jeho vyřazení z používání. U nástrojů, které lze znovu přestříhat, se jejich životnost udává po dobu, než je obroušena celá jejich funkční plocha. VBD má životnost definovanou tím, že se využili všechny její břity. [14]

Trvanlivost břitů se značí T a je všeobecně závislá na řezných podmínkách. Závislost trvanlivosti na řezných rychlostech se pro jinak konstantní podmínky popisuje Taylorovým vztahem ve tvaru: [19]

$$T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m} \quad [min] \quad (2.1)$$

C_T – konstanta-charakterizuje vlastnosti řezného nástroje	[-]
m – exponent (míra závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti)	[-]
v_c – řezná rychlost	[m/min]

Konstanta C_T závisí především na materiálu obrobku a nástroji. Nabývá hodnot 10^8 až 10^{12} . Velikost exponentu m charakterizuje především vlastnosti řezného nástroje:[19]

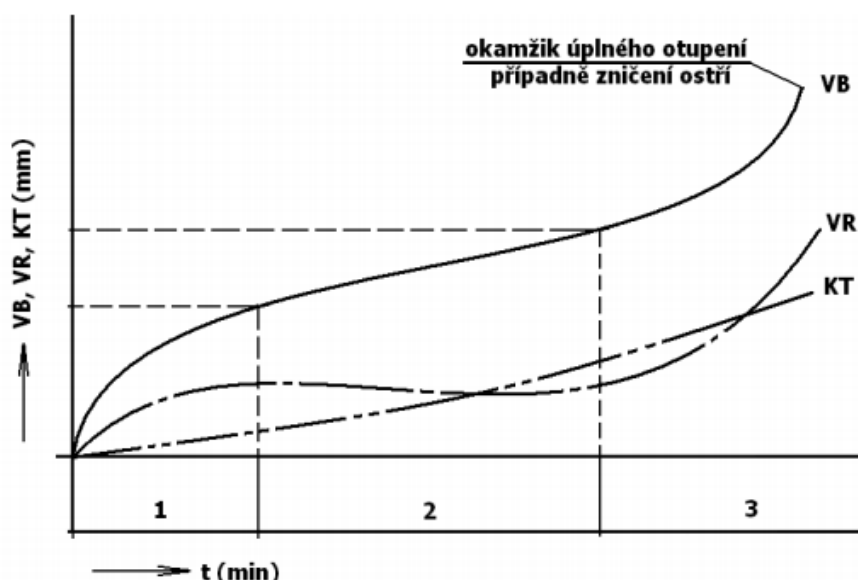
Nástrojové oceli	$m = 10 - 8$	[-]
Rychlořezné oceli	$m = 8 - 5$	[-]
Slinuté karbidy	$m = 5 - 2,5$	[-]
Řezná keramika	$m = 2,5 - 1,5$	[-]

Taylorův vztah v komplexním tvaru: [20]

$$T = \frac{C_T}{v_c^m \cdot a_p^x \cdot f^y} \quad [min] \quad (2.2)$$

T	trvanlivost nástroje	[min]
v_c	řezná rychlost	[m/min]
C_T	konstanta Taylorova vztahu	[-]
a_p	hloubka záběru	[mm]
f	posuv	[mm]
m, x, y	exponenty Taylorova vztahu	[-]

V praxi se nejčastěji měří opotřebení nástroje přímou metodou, a to konkrétně opotřebení jako jsou VB a KT. Tímto způsobem se bude i v mé práci měřit opotřebení. Hodnoty VB jsou měřeny pomocí malého dílenského mikroskopu nebo lupy tak, že se osový kříž nastaví do základní polohy. Čára představuje čelo nástroje, která se poté přesune do polohy místa opotřebení a výsledná hodnota se změří vizuálně. Naměřené hodnoty jsou vyneseny do tabulky závislosti VB/t(čas) - viz obrázek 13. [21]



Obr. 13 Typický průběh opotřebení VB, VR, a KT na době řezání [14]

OBLAST 1 – počáteční otupení – Obecně souvisí se záběhem nástroje a je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích nerovností nástroje.[14]

OBLAST 2 – rovnoměrné otupení – vrcholky nerovností jsou srovnány a průběh opotřebení je téměř lineární a intenzita je konstantní. [14]

OBLAST 3 – zrychlené otupení - Je to obvykle spojeno s limitní teplotou řezání a poklesem tvrdosti nástroje, nastává velmi rychlé, většinou lavinovité opotřebení. [14]

2.3 Teorie třískového obrábění

V současné době ve strojírenské výrobě zaujímá velmi významné místo technologie obrábění. Díky ní je možné vyrobit z polotovaru výrobek, který splňuje požadovaný tvar, rozměrovou přesnost a jakost obrobených ploch. [22]

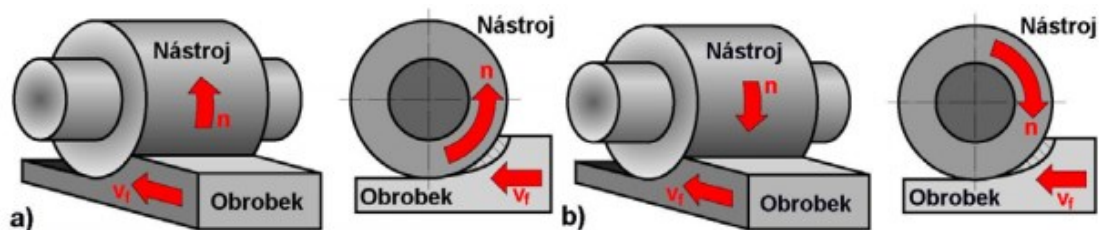
Technologie obrábění je velice široké téma. Proto zde zmíním konkrétní druh obrábění, na které je má bakalářská práce zaměřená, a to technologii frézování.

Frézování je obráběcí metoda, při které je materiál obrobku odebírán břitý rotujícího nástroje. Posuv nejčastěji koná obrobek (obráběcí nástroj) „relativní pohyb“ záleží na kinematice tohoto stroje. To znamená, že hlavní řezný pohyb koná rotující nástroj. U moderních frézovacích strojů jsou posuvové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky, u nichž je tloušťka třísky proměnná. [13]

2.3.1 Druhy frézování

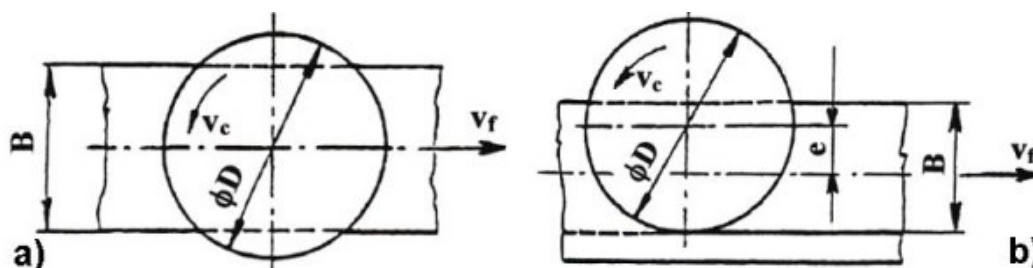
Rozlišují se dva základní typy frézování v závislosti na jejich aplikaci, a to válcové frézování a čelní frézování. Od nich jsou další způsoby odvozeny: například okružní a planetové frézování. [13]

Válcové frézování se rozumí obrábění pouze obvodem frézy, nejčastěji to jsou frézy válcové nebo tvarové. Hloubka odebírané třísky je nastavena kolmo na osu frézy a na směr posuvu. Osa otáčení frézy je rovnoběžná s obrobenou plochou. V závislosti na pohybu posuvu a otáčení frézy rozlišujeme frézování nesousledné (protisměrné, nesousměrné) a sousledné (sousměrné) viz obr. 14. [13]



Obr. 14 Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné [13]

Čelní frézy mají břity vytvořeny jak po obvodě, tak na čele nástroje. Slouží pro frézování čelní. To znamená, že osa frézy je kolmo na obrobenou plochu. Podle polohy osy frézy vzhledem k frézované ploše se také rozlišuje frézování symetrické (osa nástroje prochází středem obrobené plochy) a nesymetrické (osa nástroje je mimo střed obrobené plochy). U čelního frézování pracuje fréza zároveň sousledně tak i nesousledně. Ukázka symetrického a nesymetrického frézování je na obr. 15. [13]



Obr. 15 Čelní frézování: a) symetrické, b) nesymetrické [13]

2.3.2 Řezné podmínky

Pro zjednodušení se za řeznou rychlost v_c pokládá obvodová rychlost nástroje:[24]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (2.3)$$

D – průměr nástroje [mm]

n – otáčky nástroje [1/min]

Posuv na zub, který se značí f_z [mm] je základní jednotkou posuvového pohybu. Je to dráha, kterou obrobek urazí po dobu záběru jednoho zubu. Posuv na otáčku f_n je délka dráhy obrobku za dobu jedné otáčky nástroje. [24]

$$f_n = f_z \cdot z \text{ [mm]} \quad (2.4)$$

z – počet zubů (břitů) nástroje [-]

Vzorec pro výpočet posuvové rychlosti v_f . [24]

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z \text{ [mm/min]} \quad (2.5)$$

n – otáčky nástroje [1/min]

2.3.3 Průřez třísky

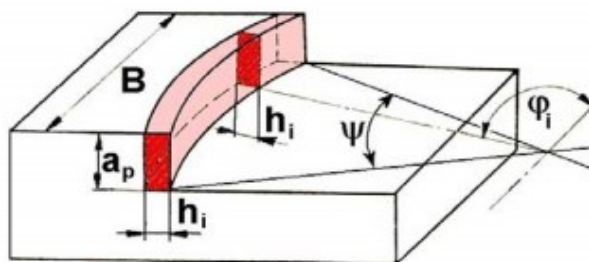
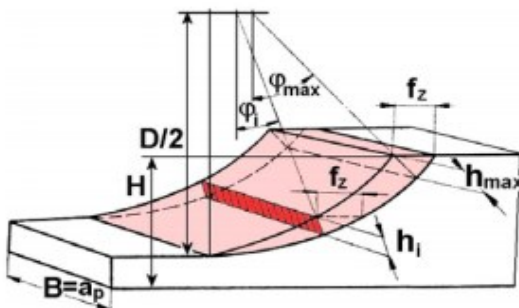
Tloušťka třísky h_i se při válcovém nesousledném frézování mění od nulové hodnoty do jejího maxima. Proti tomu u frézování sousledného je to od maximální do nulové hodnoty (obr. 16). Jmenovitá tloušťka třísky h_i v libovolné fázi jejího odřezávání se vyjádří vztahem: [13]

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm]} \quad (2.6)$$

f_z – posuv na zub [mm]

φ_i – úhel posuvového pohybu [°]

Úhel posuvového pohybu φ_i se mění v závislosti na poloze řešeného zubu, ale také na něj má vliv to, jestli má fréza šikmé zuby nebo zuby ve šroubovici. [13]



Obr. 16 Průřez třísky při válcovém frézování [13]

Obr. 17 Průřez třísky čelního frézování [13]

Jmenovitý průřez třísky pro polohu zubu frézy v jakémkoli jejím bodě se označí A_{Di} a vyjádří se na základě poměrů naznačených na obrázku č. 16: [13]

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.7)$$

U čelního frézování se tloušťka třísky mění v závislosti na úhlu posuvového pohybu φ_i a je navíc ovlivněna i úhlem nastavení hlavního ostří κ_r (na obrázku č. 17 je hodnota $\kappa_r = 90^\circ$), tím se její okamžitá hodnota pro konkrétní místo vypočítá podle vztahu: [13]

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \text{ [mm]} \quad (2.8)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} pro $\kappa_r = 90^\circ$: [13]

$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.9)$$

Počet zubů v záběru se pro čelní frézování vypočítá podle vztahu: [13]

$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \text{ [-]} \quad (2.10)$$

ψ - úhel záběru frézy (viz obr. č. 17) [°]

z - počet zubů (břitů) frézy [-]

2.3.4 Řezné síly při obrábění

Při třískovém obrábění vniká do materiálu obrobku nástroj ve tvaru klínu. V obráběném materiálu je vyvolán stav napjatosti. Stav napjatosti vede až k tomu, že se materiál oddělí. V obráběném materiálu to vyvolává plastické a elastické deformace. Zároveň zde probíhají i silové procesy. Cílem je tyto síly nalézt a určit jejich hodnoty. Tím je možno určit mechanické namáhání soustavy obrábění. Díky těmto znalostem je možné definovat pevnost nástroje a jeho geometrii břitu a také určit příkon obráběcího stroje. Dále je možné získat informace pro určení trvanlivosti řezného nástroje, respektive jeho životnosti, ale také informace pro posouzení podmínek přesnosti. Z toho odvodit celkovou ekonomickou bilanci třískového obrábění. [23]

Velmi významnou veličinou tohoto procesu je síla obrábění (řezání), lze ji chápat jako sílu potřebnou k vniknutí do materiálu. Je časově proměnná. V obráběném materiálu vzniká stav napjatosti a toto napětí vyvolává zmíněný odpor vůči vnikání nástroje. Řezná síla neustále překonává tento odpor. Grafické znázornění těchto sil je na obrázku 18. [23]

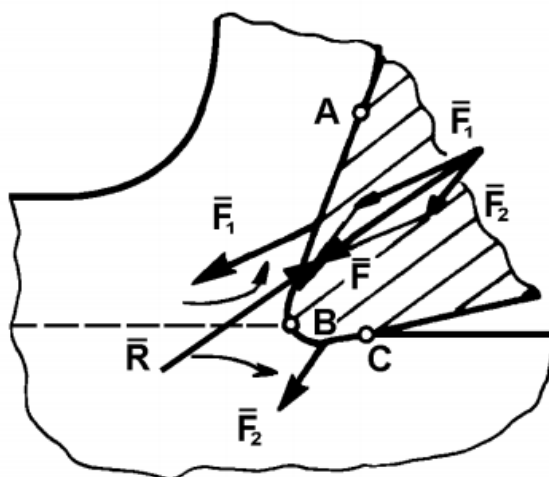
Pro podmínku rovnováhy pak platí: [23]

$$F = - R \text{ [-]} \quad (2.11)$$

F – síla obrábění [N]

R – řezný odpor [N]

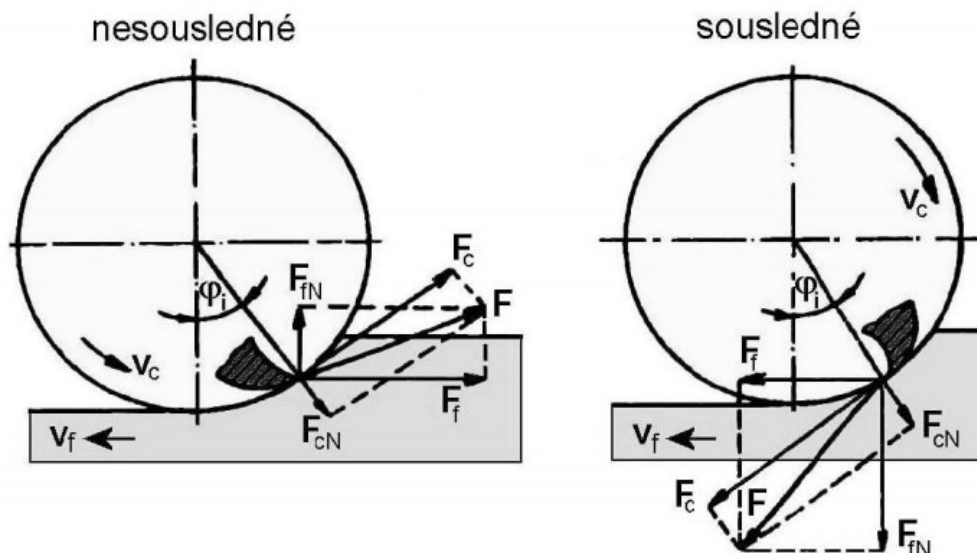
Síla řezání má dynamický charakter, je to zapříčiněno tím, že v materiálu obrobku jsou rozptýleny mechanické vlastnosti, má na to i vliv mechanická tvorba třísky. Hodnota F_{ok} kolísá $\pm 20\%$, a to i při obrábění za konstantních řezných podmínek. Pro věrohodnost výsledků se experiment několikrát opakuje. [23]



Obr. 18 Síla řezání (obrábění) a její rozklad při soustružení [23]

Síla obrábění vznikající při řezání se značí F a je výslednicí dvou složek. Aktivní složky řezání F_1 a složky pasivní F_2 . Aktivní složku řezání lze rozkládat na řeznou složku síly obrábění F_c a složku posuvovou F_f . Typický rozklad řezné síly na jednotlivé složky pro frézování je na obrázku č. 19. [23]

Poměr velikosti u jednotlivých složek je dán určitou technologií obrábění a geometrií nástroje (např. $F_C : F_P : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$). Ze všech složek síly řezání má zpravidla největší význam řezná (tangenciální) složka F_C . Je jednou ze základních formulací omezující podmínky při optimalizaci řezných parametrů. [23]



Obr. 19 Schéma rozložení složek síly řezání při frézování, F – celková řezná síla, F_c – řezná síla, F_{cN} – kolmá řezná síla, F_f – posuvová síla, F_{fN} – kolmá posuvová síla [23]

Řezná síla F_c se vyjádří na základě měrné řezné síly k_c a průřezu třísky A_D : [13]

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi \quad [N] \quad (2.12)$$

Měrná řezná síla k_c se vyjádří pomocí vztahu: [13]

$$k_c = \frac{C_{Fc}}{h^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi)^{1-x}} \quad [MPa] \quad (2.13)$$

C_{Fc} - konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu [-]

x - exponent vlivu tloušťky třísky [-]

Mimo posuvu a tloušťky obráběné vrstvy (hloubky řezu) ovlivňují absolutní velikost i vzájemný poměr ve velikosti složek také: [23]

- řezná rychlost
- geometrie břitu
- stav otupení břitu
- řezné prostředí
- pevnost a tvrdost obráběného materiálu
- řezné prostředí

2.4 Geometrie HM frézy stopkové

Použitá geometrie řezného nástroje má vliv na mnoho faktorů při obrábění například na velikost síly řezání a její rozložení do jednotlivých složek, na utváření a odvod třísky, drsnost, přesnost a kvalitu výsledné obrobené plochy, trvanlivost břitu a hospodárnost obráběcího procesu. Z toho vyplývá, že je nutné znát vhodnou pracovní geometrii břitu pro konkrétní řezné podmínky a obráběný materiál. Nástrojové a geometrické parametry charakterizují úhly, ty jsou definovány v rovinách. Pro snazší identifikaci úhlů řezné části se definují dvě souřadnicové soustavy: [22]

2.4.1 Nástrojová rovina

Tato rovina definuje geometrii břitu ve statickém pojetí. Využívá se pro konstrukci, výrobu, kontrolu a při ostření nástroje. Roviny používané v této soustavě se nazývají nástrojové roviny. Na obrázcích 20 a 21 jsou na testované fréze znázorněny nástrojové roviny. [22]

2.4.2 Pracovní rovina

V této rovině je geometrie břitu definována v procesu řezání. Někdy je označována též jako rovina kinetická či efektivní. Roviny používané v této soustavě se nazývají pracovní roviny. Jejich značení a pojmenování je totožné jako u nástrojových rovin, s tím rozdílem, že se přidává index e (např. P_{re}). [22]

Nástrojová rovina základní P_r je rovina procházející uvažovaným bodem ostří a je kolmá na předpokládaný směr hlavního řezného pohybu.

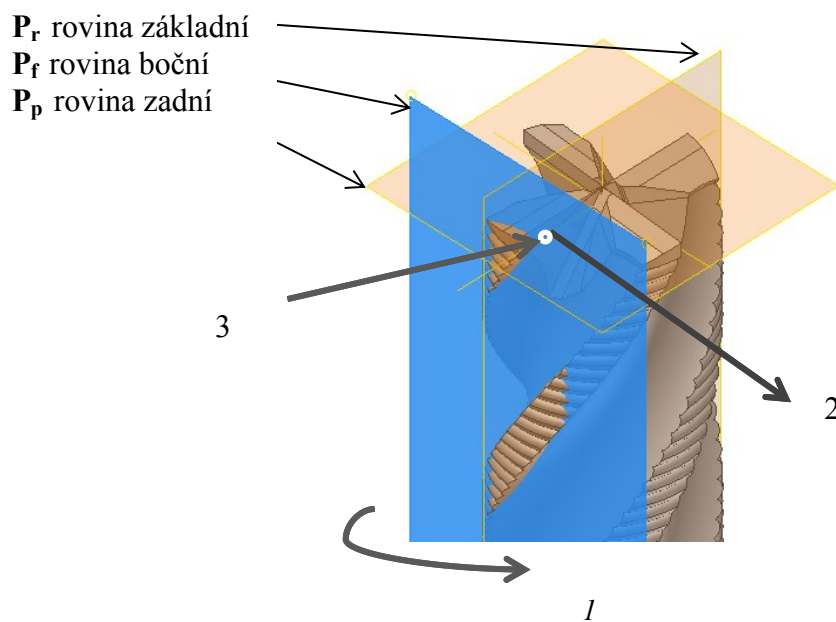
Nástrojová rovina boční P_f je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, leží v ní vektor posuvového pohybu v_f a je kolmá na rovinu základní P_r . (Pozn. leží v ní vektory všech pohybů v_c , v_f , v_e a všeobecně je tato rovina orientována ve směru posuvového pohybu).

Nástrojová rovina zadní P_p je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r a na nástrojovou rovinu boční P_f .

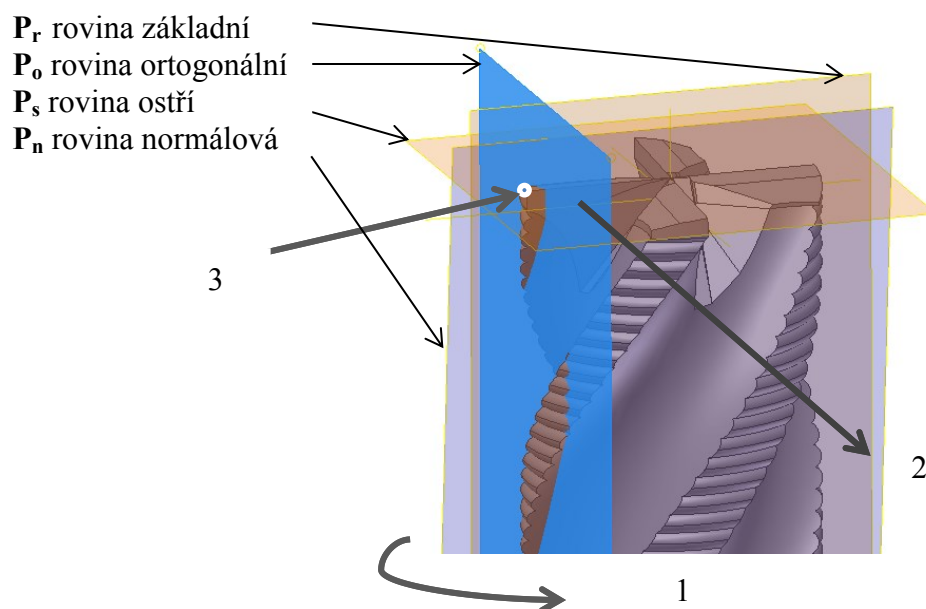
Nástrojová rovina ostří P_s je rovina tečná k ostří v uvažovaném bodě ostří, kolmá na rovinu základní P_r .

Nástrojová rovina ortogonální P_o je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r a nástrojovou rovinu ostří P_s .

Nástrojová rovina normálová P_n je rovina kolmá na ostří S v uvažovaném bodě ostří. Jako jediná není obecně kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r (pouze když je úhel sklonu ostří $\lambda_s = 0$). [22]



Obr. 20 Roviny nástrojové souřadné soustavy HM frézy stopkové (pozn. 1 – směr vektoru hlavního řezného pohybu (předpokládáný), 2 – směr posuvového pohybu, 3 – uvažovaný bod ostří) [22]



Obr. 21 Zbylé roviny nástrojové souřadné soustavy HM frézy stopkové (pozn. 1 – směr vektoru hlavního řezného pohybu (předpokládáný), 2 – směr posuvového pohybu, 3 – uvažovaný bod ostří) [22]

2.4.3 Nástrojové úhly

Úhly slouží zejména pro určení polohy geometrie ostří, čela a hřbetu. Konkrétní hodnoty těchto úhlů, které jsou na testované fréze, změřila firma ZOLLER, viz obr. 22. U nástrojových úhlů se značí i v jaké rovině byly naměřeny, a je to značeno malým indexem, který je totožný s touto rovinou, v které byly tyto hodnoty získány. Schéma znázorňující nástrojové úhly v jednotlivých rovinách je na obr. 23. [22]

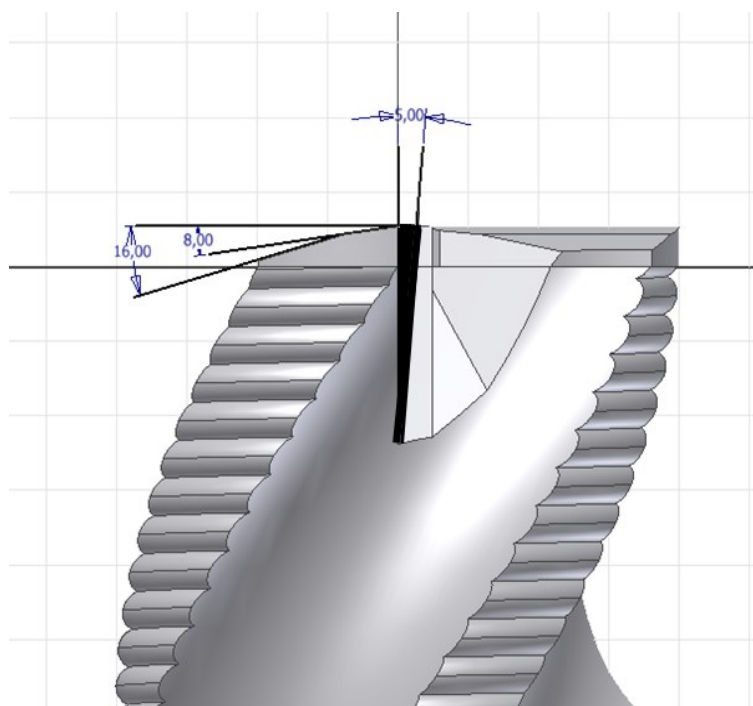
Nástrojové úhly obecně ovlivňují: [22]

- velikost síly řezání a její složky
- teplotu řezání
- tvorbu a odvod třísky
- hospodárnost obrábění
- strukturu povrchu
- vlastnosti povrchové vrstvy

Čelo γ je plocha nebo souhrn ploch, po kterých odchází tříska.[19]

Hřbet (α , α') je plocha nebo souhrn ploch, které při řezném procesu směřují k ploše obrobku. Hlavní hřbet α směřuje k ještě neobrobené části obrobku. [19]

Úhel břitu β je uhel mezi čelem a hřbetem nástroje. Velikost úhlu břitu má značný vliv na pevnost břitu, velikost řezného odporu a také na odvod tepla z místa obrábění do tělesa nástroje. Podle konkrétních podmínek obrábění se volí od 40° do 100° . [19],[26]



Obr. 22 Základní úhly čela a hřbetů použité na testovaném nástroji

Nástrojové úhly polohy ostří

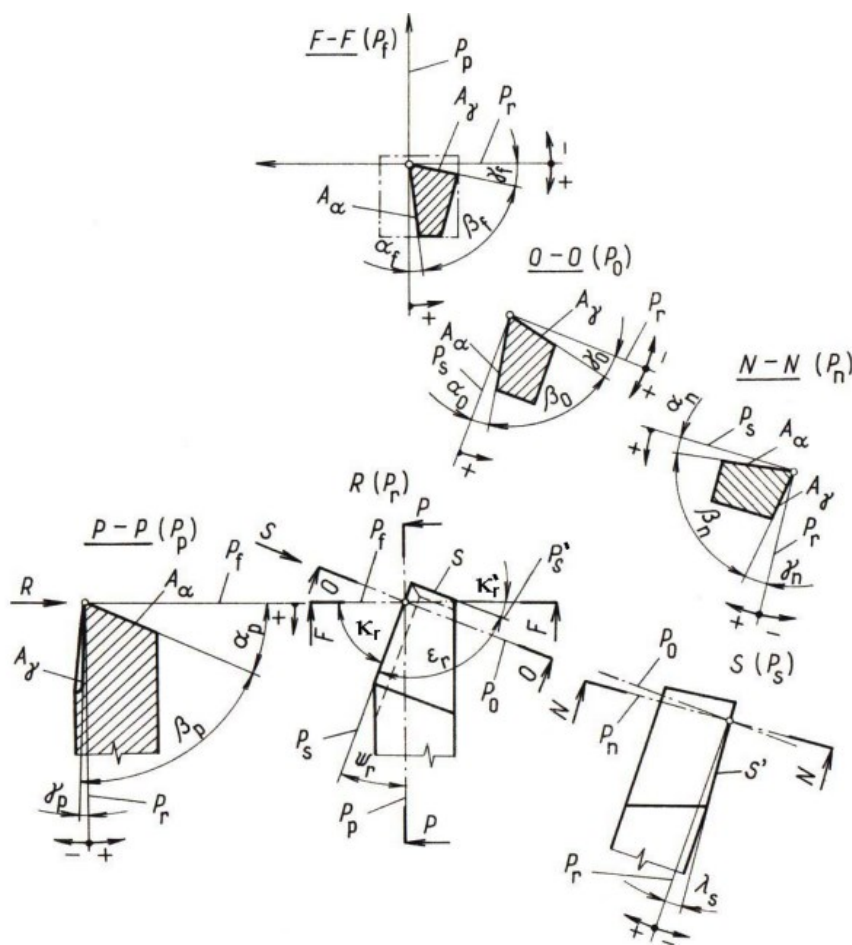
Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r leží mezi nástrojovou rovinou ostří P_s a nástrojovou rovinou boční P_f a je měřený v nástrojové rovině základní P_r .

Nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' leží mezi nástrojovou rovinou vedlejší ostří P_s' a rovinou boční P_f a je měřený v nástrojové rovině základní P_r .

Nástrojový doplňkový úhel nastavení hlavního ostří ψ_r je úhlem mezi nástrojovou rovinou ostří P_s a nástrojovou rovinou zadní P_p . Nástrojový úhel ψ_r je vždy ostrý a jeho znaménko je odvozené ze vztahu $\kappa_r + \psi_r = 90^\circ$.

Nástrojový úhel špičky ϵ_r leží mezi nástrojovou rovinou ostří P_s a nástrojovou rovinou vedlejšího ostří P_s' a je měřený v nástrojové rovině základní P_r .

Nástrojový úhel sklonu hlavního ostří λ_s leží mezi ostřím S a nástrojovou rovinou základní P_r a je měřený v nástrojové rovině ostří P_s . Úhel λ_s může nabývat jak kladných tak nulových či dokonce záporných hodnot. Kladných hodnot nabývá tehdy, je-li špička nástroje nejvyšším bodem ostří, záporných hodnot naopak je-li bodem nejnižším.[22] Mění se úhly na nástroji mají velký vliv na opotřebení, jako například úhel hřbetu a úhel čela. [19]



Obr. 23 Nástrojové úhly v rovinách P_r , P_f , P_p , P_s , P_o , P_n zakresleny na pravém ubíracím soustružnickém noži [22]

2.4.4 Volba geometrických parametrů bříty

Správná volba geometrie nástroje má značný vliv na chování nástroje v procesu obrábění. Vhodnou volbou lze ovlivnit pevnost bříty, trvanlivost, a tím i životnost nástroje, tepelné a silové zatížení nástroje, spotřebu energie obráběcího stroje. To má vliv především na kvalitu obrobku, zejména jeho přesnosti a kvalitu obrobených ploch. [22]

Jednotlivé geometrické parametry a hodnoty ovlivňují řezný proces následujícím způsobem: [22]

Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r , pro tento úhel se hodnoty volí v rozsahu $45^\circ \div 90^\circ$, vliv má především na tvar třísky (její tloušťku) a také délku ostří v záběru, závisí na něm poměr složek síly řezání v nástrojové rovině základní P_r (poměr posuvové a pasivní složky síly řezání). Správná volba tohoto úhlu má značný vliv i na tuhost špičky nástroje a její následné opotřebení při obrábění, což má také vliv na drsnost obrobeného povrchu obrobku. [22]

Nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' ovlivňuje hlavně tuhost a opotřebení špičky. Dále ovlivňuje drsnost povrchu obrobku. [22]

Nástrojový úhel sklonu ostří λ_s , je úhel nabývající hodnot od -6° do $+6^\circ$, i nulové hodnoty. Ovlivňuje především směr odchodu třísky z místa řezu (kladný úhel napomáhá odchodu třísky od obrobku a naopak). A nezanedbatelný vliv má i na tuhost špičky nástroje. [22]

Nástrojový úhel čela γ (γ_0) běžně se volí od -8° do $+8^\circ$. Jedna z hlavních hodnot bříty nástroje. Hodnota úhlu se projevuje na tvaru a utváření třísek, velikosti a poměru jednotlivých složek síly řezání. A zásadně na opotřebení nástroje. Současně s úhlem hřbetu působí i na tuhost a pevnost bříty nástroje. [22]

Nástrojový úhel hřbetu α (α_0) je v obvyklých případech konstrukčně navrhován v rozmezí od $+8^\circ$ do $+12^\circ$. Úhel ovlivňuje, jak se bude třít nástroj o obrobek. Z toho plyne i vznik tepla a jeho přechod do nástroje či třísky nebo obrobku. Dále také ovlivňuje velikost řezné síly, tuhost bříty a trvanlivost nástroje. [22]

Nástrojový úhel špičky ϵ_r je zvolen obvykle v rozsahu od 0,2 mm do 5 mm. Platí zásada, že čím je vyšší poloměr špičky, tím je možno využít vyšší posuvové rychlosti nástroje při zvýšené trvanlivosti nástroje. Poloměr špičky nám výrazně ovlivňuje drsnost obrobeného povrchu. [22]

3 POPIS POUŽITÝCH PVD POVLAKŮ

PVD povlakování (anglicky Physical Vapour Deposition) je nanášení tenké vrstvy přídavného materiálu z plynné fáze, který na povrchu nástroje vytvoří tvrdou a mimořádně přílnavou vrstvu. Technologie spočívá v tom, že se přídavný materiál odpařuje ve vysokém vakuu přímo do stavu páry. Ta kondenzuje na nástroji. Jednotlivé metody PVD se většinou liší formou nanášení přídavného materiálu a přídavných plynů (napomáhají lepšímu nanášení povlaku). Významnou výhodou této technologie je nízká teplota při procesu nanášení oproti technologii CVD. Teplota zde může dosahovat dokonce i nižších hodnot než je popouštěcí teplota u rychlořezných ocelí. Dalším přínosem této metody je v tom, že se dá provádět jako poslední krok při výrobě nástrojů. To znamená bez ztráty houževnatosti, deformace, nebo ovlivnění mikrostruktury oceli. Tyto vlastnosti učinily z technologie PVD jeden z nejpoužívanějších typů povlaků obráběcích nástrojů, tvářecích technik a také našly využití u zpracovávání plastů. [1]

Jednotlivé typy povlaků se od sebe také odlišují chemickým složením a jejich fyzikálními vlastnostmi. To je zapříčiněno chemickým složením nanášeného kovu a také přídavným kovem a samozřejmě i technologií PVD. Dále má veliký vliv konkrétní podkladový materiál a záleží na tom, jaký materiál se bude obrábět. Podle těchto hodnot se určuje jaký povlak a jakou metodou nanášení se bude aplikovat na nástroj pro určený materiál. Není ale možné zjednodušeně srovnávat vlastnosti a aplikační oblasti, např. vrstev TiN a TiAlN nebo TiCN. Každá z těchto uvedených vrstev může být totiž připravena několika PVD technologiemi založenými na odlišných parametrech PVD. Navíc i v rámci každé technologie může být mnoho rozdílů v závislosti na konstrukčním řešení povlakovacího zařízení nebo na nastavených parametrech povlakování. To vše ovlivňuje, jaké bude mít povlak vlastnosti a kvalitu. Zde na obrázku 24 je pro ukázkou znázorněna technologie oblouková s rotačními elektrodami. [2]

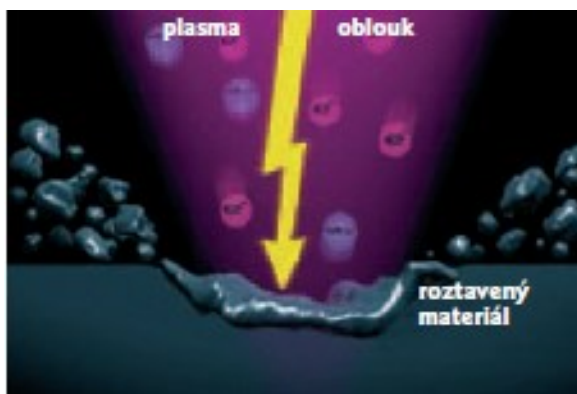


Obr. 24 Oblouková technologie s rotačními elektrodami [3]

3.1 Princip tvorby PVD povlaků

3.1.1 Technologie napařování nízkonapětovým obloukem

Výhodou této technologie je její rychlost. Doba trvání je v řádu několika hodin. Další výhodou je vysoká ionizace plazmatu. To znamená, že odpařovaný materiál má opačný náboj než deponovaný nástroj. Důsledkem toho je, že se na něm tenká vrstva snáze vytvoří. Vysoká ionizace také přináší možnost použít povlaky a jejich struktury, které se v přírodě běžně nevyskytují. Oblouk hoří na povrchu katody v místě katodové skvrny o průměru řádově 10 μm a dosahuje zde teploty okolo 15 000°C viz obr. 25. Díky těmto podmínkám se dá odpařit prakticky každý elektricky vodivý materiál. Nanášený materiál je obloukem odpařován z elektrod a zároveň je jím i ionizován. Atomům materiálu se změní elektrická neutralita na atomy s nábojem. Ionizovaný materiál (např. Ti^+ , Ti^{2+} atd.) je urychlován směrem k nástrojům záporným předpětím, které je na ně přiloženo. Po dosažení povrchu se na deponovaném nástroji vytvoří reakcemi tenká, tvrdá mimořádně odolná vrstva. [4]



Obr. 25 Schéma katodové skvrny [4]

3.1.2 Magnetronové naprašování

Magnetronové naprašování je jen zdokonalení klasické technologie naprašování. Princip celé technologie je, že se do vakuové komory přivede pracovní plyn, nejčastěji argon. Připojením napětí na terč se vyvolá zapálení doutnavého výboje. Vzniklá plazma bombarduje terč (nanášený materiál), ten je dále ionizován díky silnému magnetu. Magnet je umístěn pod terčem a chlazen vodou. Materiál se rozprašuje a nanáší se na substrát. Výhodou této technologie oproti klasickému naprašování je v udržení výboje při nízkém tlaku (řádově desetiny pascalu) i při nízkém napětí (řádově stovky voltů). V důsledku Lorentzovy síly se musí elektrony pohybovat po šroubovici podél siločar. Takto se výrazně prodlužuje jejich dráha v blízkosti terče, prodlužuje se i doba jejich setrvání v oblasti výboje a zvyšuje se pravděpodobnost jejich ionizace. Hlavní vliv nižšího tlaku se pozitivně projeví ve větší čistotě deponované vrstvy. [5]

Připouští-li se do vakuové komory kromě pracovního plynu ještě další reaktivní plyny např. kyslík, dusík apod., lze takto vytvářet oxidy, nitridy atd. Tato technologie se nazývá reaktivní magnetronové naprašování. [5]

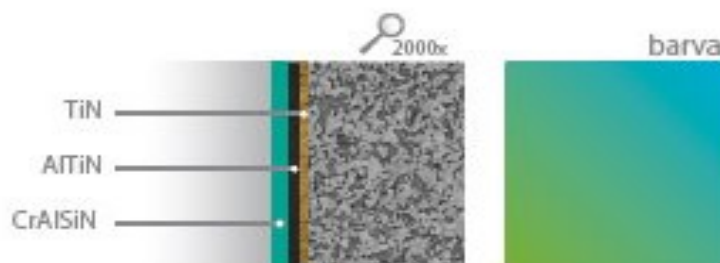
Při nanášení elektricky nevodivých materiálů vzniká u terče elektrický náboj. Ten zabraňuje dalšímu bombardování nanášeného materiálu. Řešením tohoto problému je vytvoření střídavého vysokofrekvenčního signálu, který lze rozprašovat i tyto elektricky nevodivé materiály, např. různé keramiky. [5]

Hlavními výhodami magnetronového naprašování je snadné nanesení povlaku i pro těžkotavitelné materiály. Ve vytvářené vrstvě se přitom zachovává složení slitinového terče a také stejný poměr jednotlivých složek. Umožňuje to, i za předpokladu homogenní depozice, nanášet vrstvy na větších plochách. [5]

3.2 Charakteristiky testovaných povlaků

3.1.3 TripleCoating Cr

Povlak tvoří tři vrstvy. Spodní je adhezní vrstva TiN, středová vrstva je z AlTiN a vrchní nanokompozitní vrstvu vytváří CrAlSiN. Povlak TripleCoating Cr znázorněný na obr. 26 představuje jeden z nejmodernějších povlaků, kombinuje v sobě jak vynikající houževnatost, tak i tvrdost vrstvy AlTiN. Zvláště vysokou tvrdost má nanokompozitní vrstva CrAlSiN. Povlak je určený pro obrábění tvrdých materiálů kalených, nerezových ocelí a dále na velmi náročné aplikace. Pro tento povlak se doporučuje podkladový materiál tvrdokov (HM). [6]



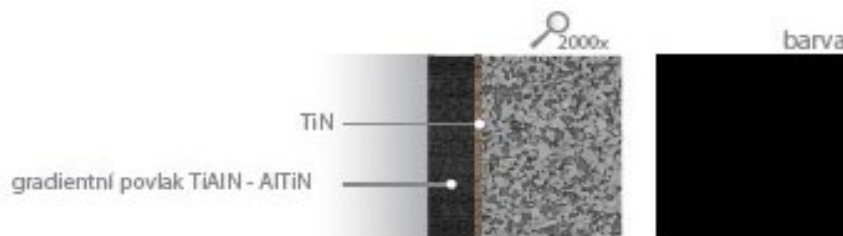
Obr. 26 Struktura povlaku [6]

3.1.4 Marwin G

Charakter povlaku je nanovrstevný gradientní systém AlTiN tvořený vrstvou, která má plynulou změnu složení viz obr. 27. Jako podkladový materiál pro tento povlak se hodí tvrdokov (HM) a rychlořeznou ocel (HSS). [7]

Univerzální povlak se širokou škálou aplikací [7]

- frézování
- vrtání
- tváření
- stříhání



Obr. 27 Struktura povlaku [7]

4 ÚPRAVY POVRCHŮ PŘED POVLAKOVÁNÍM

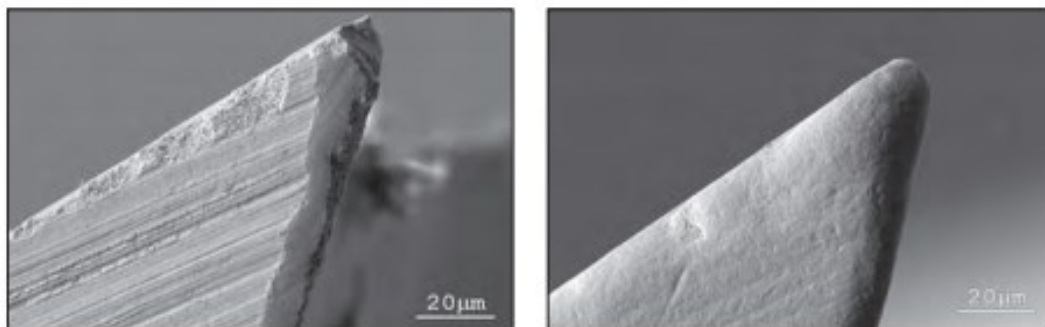
Trend v úpravách povrchu a hran řezného nástroje směřuje k prodlužování trvanlivosti nástroje, a tím pádem se i životnost může zvýšit až několikanásobně. Velký pokrok byl učiněn v oblasti mikrogeometrie břitu. Pod tímto označením mikrogeometrie nástroje si lze představit úpravy na břitu, které se pohybují v řádech mikrometrů. Zkoumá se zejména zakřivenost povrchu břitu po broušení a o defekty vzniklé po broušení, díky nerovnostem kotouče. Nejvíce ovlivňuje použitý podkladový materiál nástroje a nanášený povlak na něj. To vše spolu souvisí a má vliv na kvalitu nástroje. Velkou roli hraje, jak lze materiál nástroje vybrousit do dokonalé ostrosti a jak povlak kopíruje nástrojové plochy. Ovlivněna je drsnost povrchu. Problém většinou nastává na ostří nástroje, kde vznikají ostré hrany po broušení vlivem vytrhání tvrdých karbidů z pojiva. Tomu se dá zabránit před povlakováním různými úpravami břitu. Technologie úpravy břitu se neustále vyvíjí a rozšiřuje. [8]

Do skupiny úprav povrchů patří omílání, pískování, kartáčování, honování, ale začínají se objevovat i některé nekonvenční metody jako je úprava břitu laserem. Tyto technologie se provádí za účelem zaoblení hran po předchozím broušení. Protože povlak špatně drží na ostrých hranách a má tendenci se odlupovat. Zvýší se tím životnost nástroje a zkrátí jeho čas při zabíhání do provozu. [8]

Někdy se provádí úpravy i po nanesení povlaku. Konkrétně metoda leštění, která má za úkol zahladit mikronerovnosti a snížit tak koeficient tření. Tření vzniká mezi nástrojem a odcházející třískou. Je patrné, že všechny tyto úpravy zvyšují kvalitu obrábění, na úkor toho se nám cena nástroje zvyšuje. [8]

4.1 Úprava břitů omíláním

Jedná se o metodu, která spadá do mechanických úprav nástroje. Je důležitá tím, že má zásadní vliv na adhezi povlaku na substrátu nástroje. Po vybroušení HM nástrojů jsou totiž břity většinou nerovnoměrné. Záleží velmi na použitém brusném kotouči a jeho měřítku brusných zrn, dále také na materiálu nástroje. Je zde spousta dalších faktorů, které ovlivňují povrch břitu např. obsluha brusek, vadný kotouč, kvalita substrátu atd. Vše pak ovlivňuje vrstvu PVD povlaku a její vlastnosti se tím můžou zhoršit. Protože povlak na ostrých přerušovaných hranách (nerovnoměrnosti břitů) nedrží, může se odlupovat. Tomu účinně může zabránit omílání. Rozdíl je vidět na obr. 28. Provádí se v různě koncipovaných omílacích zařízeních s vhodně voleným granulátem a abrasivem. Výsledný efekt je v dobré adhezi PVD vrstvy na břitech nástroje, tak i ve výsledném výkonu či životnosti nástroje. Mikroúpravy povrchu břitů se můžou provádět i po aplikaci PVD vrstvy.[9]



Obr. 28 Břit před mikroúpravou, břit po mikroúpravě [10]

4.2 Úprava povrchu břitů mokrým otryskáním

Touto technologií je povrch tryskán směsí abraziva a vody. Výrobce definované optimální složení a velikost abraziva s dalšími parametry tryskání zaručí potřebné zaoblení břitů, tak i úpravu povrchu. Úpravou povrchu se myslí dokonalé odstranění nečistot bez nebezpečí zvýšení drsnosti. [11]

Otryskáním se odstraní všechny nečistoty z povrchu. Je možné i částečně odstranit nečistoty v mírně pórovitém povrchu. Tento způsob otryskávání se používá pro nebroušené slinované plochy HM materiálů nebo opotřeбенých ploch u přebroušených nástrojů. Jako vhodné abrasivum se používá SiC nebo Al_2O_3 . Některá dříve používaná media nejsou vhodná, protože jejich rezidua negativně ovlivňují adhezi nanášeného povlaků. Velikost zrn zvoleného abrasiva se pohybuje v nízkých hodnotách 20 až 100 μm . Při volbě správné technologie otryskávání se musí vždy brát ohled na charakter nástroje, jeho funkční břity a plochy. [9]

4.3 Odstranění starých povlaků

Také často nazýváno anglickým názvem stripping. Je to odstranění starých povlaků z nástrojů z rychlořezných ocelí (HSS) a slinutých karbidů (HM). Jedná se o technologii zabývající se předúpravou povrchu před vlastním nanesením nové PVD,CVD vrstvy. Technologie odstraňování starých povlaků se dělí podle podkladového substrátu.[12]

Stripping povlaků z HSS nástrojů je v principu technologie založená na chemickém nebo elektrochemickém odleptání použitého povlaku. Při ní nedochází k narušení materiálu nástroje. Je možné odstraňovat jak povlaky na bázi Ti, tak i vrstvy obsahující Cr. [12] Obvykle se používá roztok na bázi peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu. Roztok se zahřeje na teplotu kolem 70 °C. Po odstranění povlaku je nutné ihned povrch opláchnout a krátkodobě pasivovat vhodným činidlem. Nicméně existují i alternativy v podobě elektrochemické metody. [9]

Stripping povlaků z HM nástrojů je šetrná metoda odstraňování povlaku z nástrojů. Povlak je zcela odstraněn bez nebezpečí vyleptání Co ani jiných materiálů ze substrátu. Nevýhodou může být čas trvání této technologie. Ta zabere i desítky hodin. Oproti tomu výhodou je naprosté odstranění povlaků na bázi Ti. [12] Nevhodně zvolená technologie může způsobit narušení struktury materiálu tím, že vyleptá kobalt ze substrátu. To je největší riziko této technologie. Kobalt velmi citlivě reaguje na kyselé či zásadité prostředí. Nevýhoda je v tom, že jeho obsah v HM se obvykle pohybuje mezi 6 – 12%. Naleptání kobaltu jen do hloubky 5 μm způsobí vážné problémy. Zásadní vliv to má na následné povlakování i použití nástroje ve výrobě. Při této technologii je využíván peroxid vodíku. Jeho koncentrace je nižší a teplota roztoku je pokojová. I u tohoto odstraňování povlaku z HM materiálu existuje alternativní metoda. Spočívá ve strippingu na principu anodického rozpouštění. [9]

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pro experimentální práci byly vybrány stopkové hrubovací frézy s povlaky od firmy SHM, s.r.o. s obchodními názvy TripleCoating Cr a Marwin G. Povlaky byly nanесeny technologií PVD konkrétně metodou napařování nízkonapěťovým obloukem. Jeden z těchto povlaků je již ve firmě SOMA spol. s r.o. používán a o druhém se firma zamýšlí jako potenciálně vhodném pro zavedení do provozu. Všechny testy probíhaly v provozu firmy SOMA spol. s r.o. Test probíhal za konstantních řezných podmínek, při kterém byla monitorována velikost opotřebení v závislosti na čase.

5.1 Testovaný nástroj

Nástroj je HM hrubovací fréza HPC prodávaná pod obchodní značkou HOLEX od firmy Hoffmann Group. Je to stopková fréza univerzální s hrubovacím profilem pro snazší odvod třísek a s velmi vysokým výkonem při obrábění. Fréza je čtyřbřitá o průměru $D=16\text{mm}$. Substrát nástroje tvoří tvrdokov. Tyto nástroje jsou běžně používány ve firmě SOMA spol. s r.o. s povlakem Marwin G. Bylo rozhodnuto, že budou testovány výše zmíněné povlaky vždy na dvou frézách. Povlak TiAlN nanесený od výrobce byl ponechán z důvodu větší autenticity testu. Odstranění povlaku a úpravu povrchu nástroje s vlastní depozicí provedla firma SHM, s.r.o. U nástrojů nebyla provedena úprava povrchu mokrým otryskáním. Na obrázku 29 je ukázka použitého nástroje. Dále byla změřena geometrie nástroje firmou ZOLLER. Výsledky měření jsou v tabulce 1.

Výsledky měření

Měřená část	Požadovaná hod.	Horní tolerance	Spodní tolerance	Skutečná hod.	Rozdílná hod.
Házení	0	-	-	0,059	0,059
Čelní házení	0	-	-	0,003	0,003
Průměr	15,91	0,02	0,02	15,913	0,003
Úhel hřbetu 1 (čelo)	8	0,5	0,5	8,14	0,14
Úhel hřbetu 2 (čelo)	16	0,5	0,5	16,43	0,43
Šířka fazetky (čelo)	1,3	0,1	0,1	1,277	-0,023
Úhel čela	5	0,5	0,5	4,89	-0,11
Úhel hřbetu 1 (obvod)	7	1	1	7,4	0,4
Úhel šroubovice	30	1	1	29,95	-0,05
Stoupání šroub.	86	1	1	86,55	0,55

Tab. 1 Výsledky měření geometrie bříty nástroje



Obr. 29 HM hrubovací fréza HPC, Povlak- TiAlN, D=16 mm, HOLEX [29]

5.2 Použitý materiál na testy

Testovaný materiál byl zvolen dle označení ČSN ocel 11 375. Je to nelegovaná konstrukční jakostní ocel. Materiál byl válcován za tepla a nebyl žhán k odstranění vnitřního pnutí [30]. Rozměry materiálu jsou 565 x 150 x 150 mm viz obr. 30 a tabulka 2 ukazuje jeho chemické složení. Jakost materiálu byla zvolena z důvodu velké četnosti použití pro dílce v SOMA spol. s r.o.

Materiál a jeho značení dle norem: [30]

ČSN (Czech)	ISO	DIN (Germany)	Označení EN
11375	Fe360B	RSt372	S235JRG2

Chemické složení obráběného materiálu

C	P	S	N
max 0,17	max 0,045	max 0,045	max 0,009

Tab. 2 Chemické složení [hm. %]



Obr. 30 Materiál použitý pro testy – ocel dle ČSN 11 375

5.3 Parametry testů

Testy nástrojů probíhaly na vertikálním obráběcím centru MCFV 1060 firmy TAJMAC – ZPS, a.s. Stroj je zobrazen na obr. 31. Řezné parametry byly stanoveny dle tabulek od výrobce nástrojů pro konkrétní materiál. Hloubka řezu a šířka záběru byla konzultována s mým odborným vedoucím bakalářské práce. Jako způsob obrábění bylo zvoleno sousledné frézování.

Řezné podmínky:

- **Průměr frézy:** $D = 16 \text{ mm}$
- **Řezná rychlost:** $v_c = 55 \text{ m/min}$
- **Počet zubů:** $z = 4 \text{ zuby}$
- **Posuv na zub:** $f_z = 0,1 \text{ mm}$
- **Šířka záběru:** $a_e = 6 \text{ mm}$
- **Hloubka řezu:** $a_p = 10 \text{ mm}$

Výpočty řezných parametrů:

- **Otáčky:**
$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 55}{\pi \cdot 16} = 1094,19 \text{ 1/min} \quad (5.1)$$

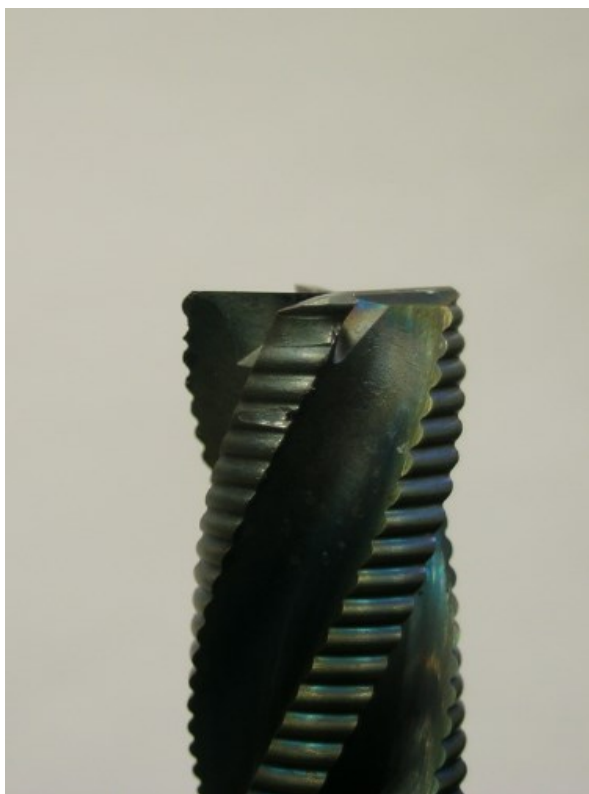
- **Posuv:**
$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 1094,19 \cdot 4 \cdot 0,1 = 437,676 \text{ mm/min} \quad (5.2)$$



Obr. 31 Vertikálním obráběcím centru MCFV 1060

5.4 Postup testu

Test spočívá v tom, že každý povlak byl vystaven opotřebení při obrábění. Jako konec testů bylo stanoveno maximální opotřebení nebo do destrukce nástroje. Během obrábění byla průběžně měřena velikost opotřebení. Perioda měření opotřebení byla stanovena na 6 minut čistého strojního času. Měření bylo prováděno na hřbetu nástroje za pomoci Brinellovy lupy. Vše bylo zaznamenáno do připravených tabulek. Součástí přílohy bakalářské práce je CD, na kterém jsou uloženy snímky z průběhu testu. Snímky byly pořízeny fotoaparátem se stativem pro možnou zpětnou kontrolu zjištěných výsledků. Ukázka jednoho ze snímků je na obr. 32. Všechny nastalé změny při obrábění jako například barva třísek či zvýšený hluk a příkon stroje byly zapisovány k jednotlivým časovým úsekům testu. Dále bylo zaznamenáno, kolik materiálu každý nástroj odebral a jak dlouho trvalo obrábění.



Obr. 32 Testovaná fréza s povlakem TripleCoating Cr

5.5 Testovaný povlak – TripleCoating Cr

Výrobce uvádí, že první z testovaných povlaků by měl být vyšší kvality a je především určen pro tvrdé kalené materiály nebo nerez. Ve firmě SOMA spol. s r.o. uvažují o zavedení do provozu. V rámci této práce bylo provedeno měření opotřebení VB v závislosti na čase obrábění. Ze získaných hodnot měření byla sestrojena tabulka 3 a následně graf – viz obr. 33.

Tab. 3 Hodnoty opotřebení v závislosti na čase obrábění

TripleCoating Cr		
Číslo měření	t [min]	VB [mm]
1	0	0
2	6	0,1
3	12,5	0,11
4	18,5	0,15
5	24,5	0,17
6	30	0,175
7	36,2	0,18
8	42,6	0,2
9	48,6	0,21
10	54,6	0,23
11	60,5	0,25
12	66,5	0,27
13	72,5	0,28
14	79	0,3
15	85	0,32
16	91,5	0,35
17	97,7	0,4
18	104	0,5
19	110	0,6
20	116,2	0,75
21	122,2	0,8
22	128,2	0,85
23	134	1
24	138	1,15
25	150	1,2
26	161	1,3
27	173	1,35
28	184	1,4
29	196,5	1,4
30	208	1,45
31	220	1,55
32	Konec testu	

5.6 Testovaný povlak – Marwin G

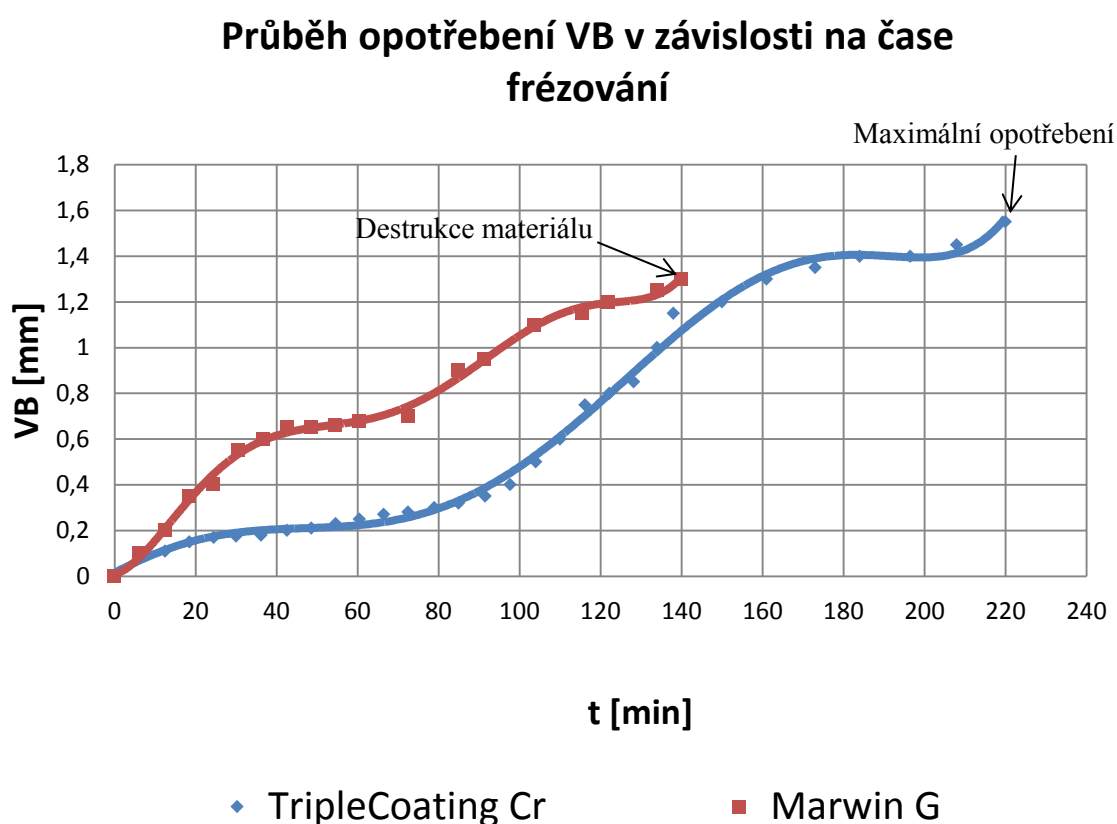
Testovaný povlak Marwin G výrobce uvádí pro obrábění ocelí konstrukčních obvyklých jakostí. To znamená přesně pro testovaný materiál. Tento povlak firma SOMA spol. s r.o. používá už řadu let, je otestován výrobou a má s ním mnoho zkušeností. Jako v předešlé kapitole bylo v rámci mé bakalářské práce provedeno měření opotřebení VB v závislosti na čase obrábění. Ze zjištěných hodnot byla sestrojena tabulka 4 a následně i graf – viz obr. 33.

Tab. 4 Hodnoty opotřebení v závislosti na čase obrábění

Marwin G		
Číslo měření	t [min]	VB [mm]
1	0	0
2	6	0,1
3	12,5	0,2
4	18,5	0,35
5	24,4	0,4
6	30,6	0,55
7	36,6	0,6
8	42,6	0,65
9	48,5	0,65
10	54,5	0,66
11	60,5	0,68
12	72,5	0,7
13	84,7	0,9
14	91,2	0,95
15	103,7	1,1
16	115,5	1,15
17	122	1,2
18	134	1,25
19	140	1,3
20	Destrukce nástroje	

5.7 Vyhodnocení výsledků

Jak bylo předpokládáno TripleCoating Cr měl větší životnost, než Marwin G. Životnost povlaku byla 220 minut čistého strojního času a bylo jím odebráno $5932,5 \text{ cm}^3$ materiálu. Druhý testovaný povlak Marwin G měl životnost 140 minut a bylo jím odebráno 3842 cm^3 materiálu. Výsledky měření opotřebení obou VB v závislosti na čase frézování jsou vyneseny v grafu na obr. 33. Graf zobrazuje porovnání průběhu opotřebení testovaných nástrojů.



Obr. 33 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase frézování obráběný materiál dle ČSN 11 375,
 $a_p = 10 \text{ mm}$, $a_e = 6 \text{ mm}$, $f_z = 0,1 \text{ mm/zub}$,
 $v_c = 55 \text{ m/min}$

5.7.1 Vyhodnocení povlaku TripleCoating Cr

Na začátku testu v 25. minutě došlo už k viditelnému opotřebení první vrstvy povlaku, dále se jedna z drážek na obvodě frézy vylomila. V 37. minutě se na povrchu nástroje začaly vytvářet malé nárůstky. Při dalším měření v 43. minutě se nárůstky již téměř nevyskytovaly. Došlo k opotřebení jednoho z povlaků. Ke konci testu ve 138. minutě došlo k téměř úplnému vymizení jednoho z povlaků. To mělo za následek velice obtížně změřitelné opotřebení. Test skončil, byli jsme přesvědčeni, že došlo k naprostému opotřebení nástroje, povlak vymizel a obráběl samotný nástroj z tvrdokovu. Při konzultaci ve firmě SHM, s.r.o. bylo zjištěno, díky optickému mikroskopu, že malá část povlaku se stále vyskytuje na ostří nástroje. Z časových důvodů už neproběhly žádné další testy. Na obrázku 34 je ukázka nástroje po ukončení testu.

Celkové množství materiálu

$$V_c = 56,5 \times 15 \times 15 = 12712,5 \text{ cm}^3$$

Množství zbylého materiálu po 1. obrábění

$$V_1 = 56,5 \times 15 \times 8 = 6780 \text{ cm}^3$$

Celkové množství odebraného materiálu:

$$V_{Tr} = V_c - V_1 = 12712,5 - 6780 = 5932,5 \text{ cm}^3$$



Obr. 34 Fréza s povlakem TripleCoating Cr po testech

5.7.2 Vyhodnocení povlaku Marwin G

U tohoto povlaku bylo na začátku testu vidět výrazné zabíhání nástroje. Počáteční otupení signalizovala barevná změna třísek a to její modrá barva. Barevná indikace po 13. minutě zmizela, ale jedna z drážek na obvodu nástroje se vylomila. V 25. minutě došlo k ustálení opotřebení. Po uplynutí 60. minut od počátku testu se na nástroji vylomilo větší množství drážek na jeho obvodu, dále bylo velmi dobře viditelné opotřebení uvnitř drážky na odvádění třísek. Drsnost povrchu po obrobení byla zhoršena - 92. minuta obrábění. Při dalším měření byl patrný zvýšený hluk při obrábění a nastal výrazný úbytek povlaku. Ke konci testu měl povlak konstantní tendenci opotřebení. Test byl ukončen, když se jeden zub frézy zatavil obráběným materiálem a bylo nutno test přerušit. Obrázek 35 ukazuje nástroj po jeho testech. Je na nich viditelné zatavení obráběného materiálu.

Množství materiálu po 1. obrábění (TripleCoating Cr)

$$V_1 = 56,5 \times 15 \times 8 = 6780 \text{ cm}^3$$

Množství materiálu po 2. obrábění (Marwin G)

$$V_2 = 56,5 \times 15 \times 3 = 2542,5 \text{ cm}^3$$

Množství materiálu co nebylo do obrobena z plochy

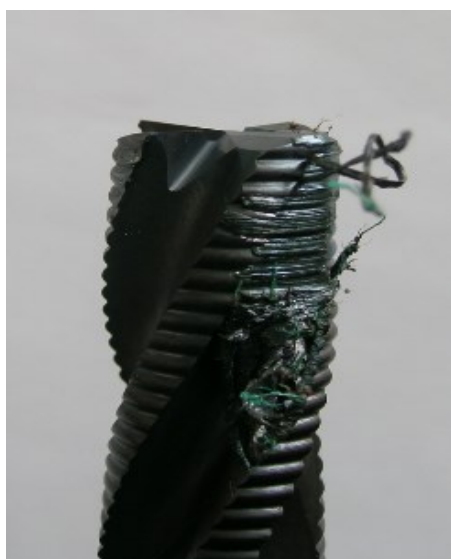
$$V_{2 \text{ zbytek.}} = 56,5 \times 7 \times 1 = 395,5 \text{ cm}^3$$

Součet množství materiálu po 2. obrábění (Marwin G)

$$V_{2 \text{ Celk.}} = V_2 + V_{2 \text{ zbytek.}} = 2938 \text{ cm}^3$$

Množství odebraného materiálu:

$$V_{\text{Mr}} = V_1 - V_{2 \text{ Celk.}} = 6780 - 2938 = \mathbf{3842 \text{ cm}^3}$$



Obr. 35 Fréza s povlakem Marwin G po testech

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je zaměřena na studium trvanlivosti obráběcího nástroje, konkrétně stopkové frézy. Hlavním úkolem bylo porovnat dva povlaky a to TripleCoating Cr a Marwin G. Povlaky nanasla firma SHM, s.r.o. Základní materiál fréz byl tvrdokov s povlakem od výrobce, který byl odstraněn a po následné úpravě povrchu byl povlak deponován pomocí technologie PVD, a to metodou napařování nízkonapětovým obloukem.

Praktická část bakalářské práce byla zaměřena na testy povlaků. Testy spočívaly v měření opotřebení VB v závislosti na čase obrábění. Studie vlastností jednotlivých povlaků z důvodu ochranné známky není zveřejněna.

Obráběním materiálem byla zvolena ocel dle ČSN 11 375 a řezné parametry byly nastaveny dle doporučení výrobce fréz. Další podmínky testu byly konzultovány s odborným vedoucím bakalářské práce. Testy probíhaly ve firmě SOMA spol. s r.o., která na jejich základě hodlá zefektivnit výrobu. Obrábění probíhalo na vertikálním obráběcím centru MCFV 1060. Měření bylo provedeno za pomoci Brinellovy lupy.

První testovaný povlak byl TripleCoating Cr, s životností 220 minut čistého strojního času a bylo odebráno $5932,5 \text{ cm}^3$ materiálu. Opotřebení VB činilo na konci testu 1,55 mm. Test byl přerušen z důvodu toho, že jsme se domnívali, že došlo k úplnému opotřebení povlaku a obráběl samotný podkladový materiál tvrdokov. Konzultace s firmou SHM, s.r.o. ukázala, že malá část povlaků stále zbyla na nástroji. Testy poté nepokračovaly z časových důvodů.

Druhý testovaný povlak Marwin G měl životnost podstatně menší. Jeho hodnoty testu jsou 140 minut strojního času a 3842 cm^3 odebraného materiálu. Opotřebení VB dosáhlo 1,3 mm. Test ukončilo zatavení materiálu do jedné zubové mezery.

Při dalším testu povlaku došlo vlivem špatného upnutí k vytažení nástroje z kleštiny, to mělo za následek destrukci nástroje. Z tohoto důvodu a také z časové náročnosti neproběhly testy vždy na dvou nástrojích se stejným povlakem. Pro statisticky prokazatelné výsledky budou testy dále pokračovat mimo bakalářskou práci ve firmě SOMA spol. s r.o.

Ze zjištěných výsledků je zřejmé že nový povlak TripleCoating Cr má mnohem delší životnost než povlak Marwin G. Vykazuje delší životnost, může být doporučen pro optimalizaci výroby. Po dalších testech proběhne ekonomické porovnání testovaných povlaků ve firmě SOMA spol. s r.o.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *BOHLER-UDDEHOLM* [online]. 2014 [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://www.bohler-uddeholm.cz/media/PVD.pdf>
- [2] HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M., RŮŽIČKA, M. Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. *MM Průmyslové spektrum*. 2004, 9, ISSN 1212-2572.
- [3] *Shm* [online]. [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/vav-centrum/pvd-technologie/>
- [4] *Shm* [online]. [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/03/2004_10.pdf
- [5] *Elektro: časopis pro elektrotechniku* [online]. [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484
- [6] *Hm* [online]. [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoatings-cr/>
- [7] *HM* [online]. [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/marwin-g/>
- [8] *Technická univerzita v Košicích Strojnická fakulta* [online]. [cit. 2014-11-11]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/20-2011/pdf/074-078.pdf>
- [9] *JMO. Jemná mechanika a optika* [online]. 2006, č. 4 [cit. 2014-11-11]. Dostupné z: <http://jmo.fzu.cz/2006/Jmo-04/JMO-200604.pdf>
- [10] *SHM* [online]. [cit. 2014-11-11]. Dostupné z: http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/03/2007_04.pdf

- [11] SHM [online]. [cit. 2014-11-11]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/upravy-nastroju/>
- [12] SHM [online]. [cit. 2014-11-11]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/stripping/>
- [13] TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část. In: *Studijní opory pro magisterskou formu studia Doc. Ing. Anton Humár, CSc.* [online]. 2013 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [14] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění* [online]. 2011 [cit. 2014-11-18]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf
- [15] NĚMEČEK, Lukáš. *Analýza řezivosti fréz pro zvolenou aplikaci* [online]. BRNO, 2011 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39997. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [16] BILÍK, Oldřich; MÁDL, Jan. *Trvanlivost břitu a provozní spolehlivost obráběcího nástroje*. Ústí nad Labem: Jiří Bartoš – Slon, 2001. 86 s. ISBN 80-7044-389-8.
- [17] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II - 1. díl*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [18] Příručka pro technology: Proces obrábění kovů - životnost nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, č. 7 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-kovu-zivotnost-nastroju.html>

- [19] ABRAHAM, Martin. *TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE* [online]. BRNO, 2008 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5250. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce doc. Ing. JAROSLAV PROKOP, CSc.
- [20] OPOTŘEBENÍ A TRVANLIVOST NÁSTROJE. In: *Moodle-prumyslovka-trebesin* [online]. 2013 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: http://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/6644/mod_resource/content/0/5.%20Opot%C5%99ebn%C3%AD%20a%20trvanlivost.pdf
- [21] MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE. In: *Experimentální metody* [online]. BRNO, 2003 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody_cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf
- [22] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘÍKOVSKÁ. *Technologie II* [online]. 2007 [cit. 2014-12-09]. ISBN 978-80-248-2147-4. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [23] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění* [online]. 2011 [cit. 2014-12-09]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf
- [24] ČEP, Robert, Jana NOVÁKOVÁ, Josef BRYCHTA, Marek SADÍLEK a Lenka PETŘÍKOVSKÁ. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. 2007 [cit. 2014-12-09]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [25] ČEP, Robert. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu – disertační práce*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava Fakulta strojní, 2005. 101s.
- [26] *Základy obrábění* [online]. 2006 [cit. 2015-01-23]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>

- [27] *SOMA* [online]. 2012 [cit. 2015-01-29]. Dostupné z: <http://www.soma-eng.com/cs/>
- [28] Hoffmann Group. *TK-frézy* [online]. 2014 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/Mono-obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/TK-fr%C3%A9zy/TK-hrubovac%C3%AD-fr%C3%A9za-HPC-TiAlN-4-mm-HOLEX/p/205492-16>
- [29] FIX METALL. In: *Stahl ST37 Stab Vierkant Blank* [online]. 2014 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.fixmetall.at/dt_portfolio/blankstahl-vierkant/

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Sídlo firmy SOMA spol. s r.o. [27]	14
Obr. 2 Hlavní mechanizmy opotřebení břitů nástroje [14]	16
Obr. 3 Místo výskytu nárůstu [15],[25]	17
Obr. 4 Místo výskytu opotřebení hřbetu [15], [25].....	18
Obr. 5 Místo výskytu výmolu na čele [15], [25]	18
Obr. 6 Místo oxidační rýhy na vedlejším břitu [15], [15].....	19
Obr. 7 Místo výskytu plastické deformace špičky [15], [25]	19
Obr. 8 Místo výskytu vrubového opotřebení na hlavním břitu [15], [25]	20
Obr. 9 Místo výskytu křehkého porušení řezné hrany [15], [25]	20
Obr. 10 Místo výskytu hřebenovitých trhlin [15], [25]	21
Obr. 11 Destrukce břitů [15], [25]	21
Obr. 12 Délkové charakteristiky otupení břitů [16].....	22
Obr. 13 Typický průběh opotřebení VB, VR, a KT na době řezání [14]	26
Obr. 14 Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné [13]	27
Obr. 15 Čelní frézování: a) symetrické, b) nesymetrické [13]	28
Obr. 16 Průřez třísky při válcovém frézování [13]	
Obr. 17 Průřez třísky čelního frézování [13]	29
Obr. 18 Síla řezání (obrábění) a její rozklad při soustružení [23]	31
Obr. 19 Schéma rozložení složek síly řezání při frézování [23].....	32
Obr. 20 Roviny nástrojové souřadné soustavy HM frézy stopkové [22].....	35
Obr. 21 Zbylé roviny nástrojové souřadné soustavy HM frézy stopkové [22].....	35
Obr. 22 Základní úhly čela a hřbetů použité na testovaném nástroji.....	36
Obr. 23 Nástrojové úhly v rovinách Pr , Pf , Pp , Ps ,Po , Pn zakresleny na pravém ubíracím soustružnickém noži [22].....	37
Obr. 24 Oblouková technologie s rotačními elektrodami [3]	40
Obr. 25 Schéma katodové skvrny [4]	41
Obr. 26 Struktura povlaku [6].....	42
Obr. 27 Struktura povlaku [7].....	43
Obr. 28 Břit před mikroúpravou, břit po mikroúpravě [10].....	45
Obr. 29 HM hrubovací fréza HPC, Povlak- TiAlN, D=16 mm, HOLEX [29].....	49
Obr. 30 Materiál použitý pro testy – ocel dle ČSN 11 375	50
Obr. 31 Vertikálním obráběcím centru MCFV 1060.....	51
Obr. 32 Testovaná fréza s povlakem TripleCoating Cr	52

Obr. 33 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase frézování obráběný materiál dle ČSN 11 375	55
Obr. 34 Fréza s povlakem TripleCoating Cr po testech	56
Obr. 35 Fréza s povlakem Marwin G po testech	57

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 5. 1 Výsledky měření geometrie břitu nástroje.....	49
Tab. 5. 2 Chemické složení [hm. %].....	50
Tab. 5. 3 Hodnoty opotřebení v závislosti na čase obrábění	53
Tab. 5. 4 Hodnoty opotřebení v závislosti na čase obrábění	54

10 SEZNAM PŘÍLOH NA CD

PŘÍLOHA A - Testovaný povlak TripleCoating Cr

PŘÍLOHA B - Testovaný povlak Marwin G

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat mé vedoucí bakalářské práce paní doc. Jitce Podjuklové, hlavně za její pomoc při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat všem pracovníkům ve firmě SOMA spol. s r.o. a firmě SHM, s.r.o. kteří mi vždy vycházeli vstříc a pomáhali při realizaci bakalářské práce. Rád bych také poděkoval rodině a mé přítelkyni, ti mě po celou dobu studia plně podporovali a pomáhali mi. Hlavně bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomáši Kristkovi a panu Ing. Jiřímu Miřejovskému za jejich odborné rady a asistenci při vypracování praktické části bakalářské práce.